

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Algimantas DANILEVIČIUS

DISKRETINIS KELIŲ TRANSPORTO  
PRIEMONIŲ SRAUTO TYRIMO METODAS  
MOMENTINIAM TRIUKŠMO LYGIUI  
GATVĖSE NUSTATYTI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,  
TRANSPORTO INŽINERIJA (T 003)



LEIDYKLA  
Vilnius TECHNIKA 2020

Disertacija rengta 2015–2020 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

### **Vadovas**

prof. habil. dr. Marijonas BOGDEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – T 003).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

### **Pirmininkas**

prof. habil. dr. Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – T 003).

### **Nariai:**

prof. dr. Marija BURINSKIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – T 003),

prof. habil. dr. Marianna JACYNA (Varšuvos technologijos universitetas, Lenkija, transporto inžinerija – T 003),

doc. dr. Artūras KERŠYS (Kauno technologijos universitetas, transporto inžinerija – T 003),

prof. habil. dr. Konstantinas PILECKAS (Vilniaus universitetas, matematika – N 001).

Disertacija bus ginama viešame Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2020 m. birželio 23 d. 14 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2020 m. gegužės 22 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt>, Vilniaus Gedimino technikos universiteto (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva), Klaipėdos universiteto (H. Manto g. 84 K5, LT-92294 Klaipėda, Lietuva), Vytauto Didžiojo universiteto (K. Donelaičio g. 52-215 kab., LT-44244 Kaunas, Lietuva), Kauno technologijos universiteto (K. Donelaičio g. 20, LT-44239 Kaunas, Lietuva) bibliotekose.

VGTU leidyklos TECHNIKA 2020-011-M mokslo literatūros knyga  
<http://leidykla.vgtu.lt>

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2020

© Algimantas Danilevičius, 2020

[algimantas.danilevicius@vgtu.lt](mailto:algimantas.danilevicius@vgtu.lt)

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Algimantas DANILEVIČIUS

DISCRETE ROAD TRAFFIC FLOW  
RESEARCH METHOD TO DETERMINE  
THE INSTANTANEOUS NOISE LEVEL  
ON THE STREETS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,  
TRANSPORT ENGINEERING (T 003)



LEIDYKLA  
Vilnius TECHNIKA 2020

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2015–2020.

### **Supervisor**

Prof. Dr Habil. Marijonas BOGDEVICĖIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – T 003).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Transport Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

### **Chairman**

Prof. Dr Habil. Henrikas SIVILEVICĖIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – T 003).

### **Members:**

Prof. Dr Marija BURINSKIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – T 003),  
Prof. Dr Habil. Marianna JACYNA (Warsaw University of Technology, Transport Engineering – T 003),  
Assoc. Prof. Dr. Artūras KERŠYS (Kaunas University of Technology, Transport Engineering – T 003),  
Prof. Dr Habil. Konstantinas PILECKAS (Vilnius University, Mathematics – N 001).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Transport Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **2 p. m. on 23 June 2020.**

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 22 May 2020.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt>, at the library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania), at the library of Klaipėda University (H. Manto st. 84 K5, LT-92294 Klaipėda, Lithuania), at the library of Vytautas Magnus University (K. Donelaičio st. 52-215 rm., LT-44244 Kaunas, Lithuania) and at the library of Kaunas University of Technology (K. Donelaičio st. 20, LT-44239 Kaunas, Lithuania).

# Reziumė

Disertacijoje nagrinėjami gatvių transporto srautai (TS) ir jų skleidžiamas triukšmo lygis (TL). Pagrindinis tyrimo objektas yra kelių transporto srautų gatvėse, jas supančios aplinkos ir transporto priemonių skleidžiamo momentinio triukšmo lygio sąveika. Triukšmas, viršijantis normas, kuris sklinda nuo TP, yra vienas svarbiausių veiksnių, turinčių neigiamą įtaką eismo dalyvių bei netoli gatvių esančių (gyvenančių, dirbančių, besimokančių, poilsiaujančių, besigydančių...) žmonių sveikatai, poilsui, jis trukdo darbui. Išsami TS ir jo skleidžiamo triukšmo lygio analizė leidžia nustatyti TS dinaminių procesų įtaką triukšmo lygiui bei galimas tinkamas priemones jam sumažinti. Disertacijos tikslas – patobulinti diskretinį transporto srauto tyrimo metodą, leidžiantį įvertinti jų dinaminį procesus, turinčius įtakos skleidžiamam momentiniam triukšmo lygiui miesto gatvėse.

Disertacijoje nagrinėjamas šviesoforų signalų valdymo bei eismo įvykio įtaka TS dinaminiam procesams taikant patobulintą diskretinį transporto srauto tyrimo metodą (DTSTM). Transporto srauto skleidžiamas momentinis triukšmo lygis nustatomas įvertinant patobulinto diskretinio transporto srauto tyrimo metodo gautus rezultatus ir eksperimentinius triukšmo lygio duomenis, įvertinančius kelio dangos būklę, transporto priemonių važiavimo greitį ir kategoriją.

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, bendrosios išvados, literatūros ir autorius publikacijų disertacijos tema sąrašai ir keturi priedai.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, nurodomi tyrimų metodai ir įranga, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Jame pateikti kitų tyrėjų duomenys ir rezultatų reikšmė transporto srautų bei triukšmo tyrimuose. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje pateiktas patobulintas diskretinis transporto srauto tyrimo metodas ir sukurta momentinio triukšmo lygio tyrimo metodika.

Trečiajame skyriuje pateikti transporto srautų dinaminių procesų ir jų skleidžiamo triukšmo eksperimentinių tyrimų rezultatai.

Ketvirtajame skyriuje pateikta transporto srauto parametrų įtakos momentiniam triukšmo lygiui teorinio modeliavimo rezultatų analizė.

Disertacijos tema paskelbti 7 straipsniai: vienas – straipsnių rinkinyje, įtraukta į *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazę, du – recenzuojamame mokslo žurnale, du – tarptautinių konferencijų leidiniuose, referuojamuose *Clarivate Analytics* duomenų bazėje *Proceedings*, du – tarptautinės konferencijos leidinyje. Disertacijos tema perskaityti 4 pranešimai tarptautinėse konferencijose.

# Abstract

The thesis investigates street traffic flows (TF) and their noise level (NL). The main object of the research is the interaction between road traffic flows in the streets, the surrounding environment and the instantaneous noise emitted by vehicles. Noise emitted by the vehicles is one of the most important factors; it causes the negative effect on the health of road users and people near the streets (living, working, studying, resting, healing...) and hinders their labour activities. A detailed analysis of the traffic flow and its noise level enables determining the influence of the traffic flow dynamic processes on the noise level and possible appropriate measures to reduce it. The aim of the thesis is to modify the discrete traffic flow research method, which allows evaluating their dynamic processes influencing the instantaneous noise level emitted on city streets.

The thesis investigates the influence of traffic light control and a traffic accident on the traffic flow dynamic processes upon applying the modified discrete traffic flow research method. The instantaneous level of the noise emitted by the traffic flow is determined on evaluating the results obtained by the modified discrete traffic flow research method and experimental noise level data upon assessing the condition of the road surface, the speed, and the category of vehicles.

The thesis includes the introduction, four chapters, general conclusions, the list of references and the list of publications of the author on the subject of the thesis and 4 annexes.

The introduction reveals the investigated problem, importance of the thesis and the object of research; it describes the purpose and the tasks of the thesis, research methods and equipments, scientific novelty, the practical significance of results examined in the thesis and the defended statements. The introduction ends in presenting the author's publications on the subject of the defended thesis, offering the material of made presentations in conferences and defining the structure of the thesis.

In the first chapter, sources of scientific literature on the subject of the thesis are reviewed. It provides data from other researchers and the essence of the results in traffic flow and noise studies. At the end of the chapter, conclusions are drawn, and the tasks for the thesis are reconsidered.

The second chapter presents a modified discrete traffic flow research method and a developed instantaneous noise level research methodology.

The third chapter presents the results of the experimental research on traffic flows dynamic processes and their noise.

The fourth chapter presents the analysis of theoretical modeling results of the influence of traffic flow parameters on the instantaneous noise level.

On the topic of the thesis, 7 scientific papers were published: one – in scientific journal included in the *Clarivate Analytics Web of Science*, two – in reviewed scientific journal, two – in the *Clarivate Analytics Proceedings* data base publications, two – in the scientific conference materials. Four presentations on the subject have been given provided in conferences of international level.

---

# Žymėjimai

## Simboliai

- $a_{\max}$  – maksimalus transporto priemonės greitėjimo pagreitis, m/s<sup>2</sup>;  
 $A_{qk}$  –  $k$ -oji transporto srauto eismo intensyvumo amplitudė, aut./s;  
 $A_{vk}$  –  $k$ -oji transporto srauto greičio amplitudė, m/s;  
 $b_{\max}$  – maksimalus transporto priemonės lėtėjimo pagreitis, m/s<sup>2</sup>;  
 $\hat{b}$  – maksimalus apskaičiuotas transporto priemonės  $n-1$  lėtėjimo pagreitis, transporto priemonės  $n$  atžvilgiu, m/s<sup>2</sup>;  
 $d^*$  – pasirinktas transporto priemonės visiško sustojimo atstumas iki priekyje esančios transporto priemonės, m;  
 $k_i(t)$  – transporto priemonių koncentracija  $i$ -tame gatvės mazge, aut./m;  
 $k_{\max}$  – maksimali galima transporto priemonių koncentracija, aut./m;  
 $k_{vid}$  – vidutinė transporto priemonių koncentracija, aut./m;  
 $LA_{eq, 20^\circ C}$  – ekvivalentinis triukšmo lygis, esant 20 °C oro temperatūrai, dB;  
 $LA_{eq, ^\circ C}$  – išmatuotas ekvivalentinis triukšmo lygis, esant temperatūrai  $T_{oro}$ , dB;  
 $LA_{eq(h), i}$  – vidutinis valandos ekvivalentinis triukšmo lygis, dB;  
 $LA_{eq, i}$  – ekvivalentinis triukšmo lygis, esant atstumui  $r_i$ , dB;

$LA_{eq,T}$  – ekvivalentinis triukšmo lygis, esant atstumui  $r_T$ , dB;

$LA_{eq,T,sum}$  – suminis ekvivalentinis triukšmo lygis, įvertinantis visų transporto priemonių skleidžiamą triukšmo lygį, esant atstumui  $r_T$ , dB;

$L_{i,i+1}$  – gatvės elemento ilgis, m;

$l_{n-1}$  – fizinis transporto priemonės  $n-1$  ilgis, m;

$N_{auto,e}$  – transporto priemonių skaičius kiekviename gatvės elemente, vnt.;

$N_e$  – gatvės elementų skaičius, vnt.;

$N_i$  – transporto priemonių skaičius gatvės mazge  $i$ , vnt.;

$N_{in}$ ,  $N_{out}$  – eismo juostų skaičius, kurios įeina ir išeina  $i$ -tame gatvės mazge, vnt.;

$p_{in,i,j}$ ,  $p_{out,i,j}$  – tikimybė TS suskaidymo ar sujungimo tam tikrame gatvės mazge;

$q_{in}(t)$  – transporto srauto eismo intensyvumas pirmame gatvės mazge, aut./s;

$q_{in_0}$  – vidutinė transporto srauto eismo intensyvumo reikšmė, aut./s;

$q_{out}(t)$  – transporto srauto intensyvumas paskutiniame gatvės mazge, aut./s;

$r$  – koreliacijos koeficientas;

$r_i$  – atstumas nuo transporto priemonės iki atskaitos taško, kuriame žinomas triukšmo lygis, m;

$r_{min}$  – mažiausias leidžiamas koreliacijos koeficientas;

$r_T$  – atstumas nuo transporto priemonės iki atskaitos taško, kuriame nežinomas triukšmo lygis, m;

$R^2$  – determinacijos koeficientas;

$s^*$  – saugus atstumas iki transporto priemonės, m;

$s_n(t)$  – atstumas tarp transporto priemonės laiko momentu  $t$ , m;

$T$  – šviesoforo signalų perjungimo ciklo periodas, s;

$T_{oro}$  – oro temperatūra eksperimento metu, °C;

$v_i(t)$  – transporto srauto greitis  $i$ -tame gatvės mazge, m/s;

$v_{in_0}$  – vidutinė transporto srauto greičio reikšmė, m/s;

$v_{in}(t)$  – transporto srauto greitis pirmame gatvės mazge, m/s;

$v_n$  –  $n$ -tosios transporto priemonės greitis, m/s;

$v_{out}(t)$  – transporto srauto greitis paskutiniame gatvės mazge, m/s;

$v_{opt}$  – optimalus transporto srauto greitis, m/s;

$v_s$  – saugus transporto priemonės greitis, m/s;

$v_{iksl.}$  – transporto srauto greičio leidžiama tolerancija, m/s;

$x_{i,j}$  – gatvės elementų ribos, m;

$x_n(t)$  – transporto priemonės  $n$  priekio padėtis laiko momentu  $t$ , m;



$\tau_{i,j}$  – laiko intervalas reikalingas transporto srautui nuvažiuoti, gatvės elemento ilgio, kelio atkarpa, s;

$\tau$  – vairuotojo reakcijos laikas, s;

$\varphi_{qk,in}$  –  $k$ -oji TS eismo intensyvumo amplitudės pradinė fazė;

$\varphi_{vk,in}$  –  $k$ -oji TS greičio amplitudės pradinė fazė.

## Santrumpos

CPX – padangos ir kelio dangos sąveikos sukeliama triukšmo matavimo artumo metodas (angl. *Close-ProXimity*);

DTSTM – diskretinis transporto srauto tyrimo metodas;

ES – Europos Sąjunga;

MTL – (transporto srauto skleidžiamas) momentinis triukšmo lygis;

MTLTM – (transporto srauto skleidžiamo) momentinio triukšmo lygio tyrimo metodika;

SPB – keliu važiuojančios transporto priemonės skleidžiamo triukšmo matavimo statistinis metodas (angl. *Statistical Pass-By*);

TL – (transporto srauto skleidžiamas) triukšmo lygis;

TP – transporto priemonė;

TS – transporto srautas.

## Sąvokos

Aptikimo zona – teritorija, patenkanti į matavimo prietaisų matymo lauką.

Burlapas – šiurkštus drobinio pynimo audinys iš suktinių džiuoto ar sizalio ar jų mišinio su kitais augaliniais pluoštais verpalų. Naudojamas kelio dangų mikrotekstūravimui, tempiant per dangos paviršių.

Furjė eilutė – periodinis funkcijos vaizdavimas kaip tokio pavidalo periodinių funkcijų suma.

Gatvė – kelias ar jo ruožas, esantis miesto ar kaimo gyvenamosios vietovės teritorijoje, paprastai turintis pavadinimą.

Gatvės infrastruktūra – gatvę supantys objektai ir statiniai, kurie palaiko jos struktūrą bei jos funkcionavimą.

Gatvės elementas – išskaidyto gatvės ruožo, tam tikro ilgio atkarpa.

Gatvės mazgas – mazgas, jungiantis gretimus gatvės elementus.

Gatvės ruožas – visas gatvės ilgis arba jos dalis.

Kelias – inžinerinis statinys, skirtas transporto priemonių ir pėsčiųjų eismui. Kelią sudaro žemės sankasa, važiuojamoji dalis, kelkraščiai, skiriamoji juosta, kelio grioviai, sankryžos, autobusų sustojimo aikštelės, poilsio aikštelės, pėsčiųjų ir dviračių takai, kelio statiniai, techninės eismo reguliavimo priemonės, želdynai, esantys kelio juostoje, kelio oro

sąlygų stebėjimo ir transporto eismo apskaitos, apšvietimo bei kiti įrenginiai su šių objektų užimama žeme.

Kelio dangos būklė – informacija apie kelio dangos paviršiaus savybes (sausa, šlapia, padengta sniegu), kurios turi įtakos saugiam judėjimui kelyje.

Mažo greičio kelio kategorija – kai sąlygos susijusios su eismu judančiu vidutiniu greičiu nuo 45 km/h iki 64 km/h.

Kelio (gatvės) laidumas – maksimalus galimas transporto priemonių skaičius, kertantis eismo juostos, kelio ar tako pasirinktą tašką per laiko vienetą (dažniausiai valandą), išreiškiamas transporto priemonių skaičiumi.

Metodas – speciali priemonė ir procedūra, kuri naudojama duomenims rinkti ir analizuoti.

Metodika – tarpusavyje susietų keleto metodų grupė, kuri naudojama duomenims rinkti ir analizuoti.

Momentinis triukšmo lygis – triukšmo lygio vertė, kuri nustatoma konkrečiu laiku.

Nusistovėjęs transporto priemonių eismas – periodinis transporto srauto dinaminį parametrų kitimas laike be reikšmingų skirtumų.

Pertraukiamas eismas – reguliuojamas TP judėjimas (šviesoforais, kelio ženklais), reguliuojamose srautų vietose susidaro transporto priemonių eilė.

Saugus laiko tarpas – laikas, skirtas reakcijai į priekyje atsiradusią kliūtį ir veiksams atlikti, skirtiems išvengti susidūrimo.

Sekėjo vairavimo elgsena – transporto priemonės reakcija į priekyje važiuojančios transporto priemonės veiksmus.

Sekimo paskui lyderį modelis – modelis, naudojamas nustatyti, kaip transporto priemonės seka viena kitą kelyje.

Skirtingos eismo sąlygos – veiksniai, turintys įtakos transporto srauto eismui, tokie kaip TS valdymo priemonės, padidėjusi koncentracija, matomumas.

Šviesoforo periodas – šviesoforo signalų (žalio, geltono, raudono) ciklas.

Transporto eismo intensyvumas – transporto priemonių skaičius, kertantis eismo juostos, kelio ar tako pasirinktą tašką per laiko vienetą (dažniausiai valandą), išreiškiamas transporto priemonių skaičiumi.

Transporto priemonių koncentracija – transporto priemonių skaičius tam tikro ilgio eismo juostos atkarpoje.

Transporto priemonių koncentracijos stabilumas – transporto priemonių koncentracijos kitimo išraiška, stabilu laikomas tolygus koncentracijos kitimas be reikšmingų skirtumų.

Transporto srauto greitis – visų transporto priemonių vidutinis greitis tiriamajame kelio mazge.

Vidutinio greičio kelio kategorija – kai sąlygos susijusios su eismu judančiu vidutiniu greičiu nuo 65 km/h iki 99 km/h.

---

# Turinys

IVADAS .....	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	2
Darbo tikslas.....	2
Darbo uždaviniai .....	2
Tyrimų metodika .....	3
Darbo mokslinis naujumas .....	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė .....	4
Ginamieji teiginiai .....	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	5
Padėka .....	5
1. TRANSPORTO SRAUTO IR JO SKLEIDŽIAMO TRIUKŠMO LYGIO TYRIMO METODŲ ANALIZĖ .....	7
1.1. Transporto srauto dinaminio proceso tyrimo metodai .....	7
1.1.1. Diskretinių transporto srauto tyrimo metodų analizė .....	8
1.1.2. Transporto srauto tyrimo metodai panaudojant hidrodinamikos lygtis .....	10
1.1.3. Transporto srauto tyrimo metodai panaudojant sekimo paskui lyderį modelius .....	12
1.2. Transporto srauto skleidžiamo triukšmo tyrimo metodų analizė.....	17
1.3. Standartai ir reglamentai transporto priemonių triukšmo lygiui tirti .....	27

1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	29
<b>2. PATOBULINTAS DISKRETINIS TRANSPORTO SRAUTO TYRIMO METODAS IR SUKURTA MOMENTINIO TRIUKŠMO LYGIO TYRIMO METODIKA .....</b>	<b>31</b>
2.1. Patobulintas diskretinis transporto srauto tyrimo metodas .....	32
2.2. Transporto srauto skleidžiamo momentinio triukšmo lygio tyrimo metodika ....	38
2.3. Antrojo skyriaus išvados .....	42
<b>3. TRANSPORTO SRAUTO DINAMINIŲ PROCESŲ IR JO SKLEIDŽIAMO TRIUKŠMO EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI.....</b>	<b>43</b>
3.1. Matavimo prietaisų transporto srauto dinaminiam procesams tirti apžvalga ....	43
3.2. Naudoti matavimo prietaisai transporto srauto dinaminiam procesams ir transporto priemonių skleidžiamam triukšmui tirti.....	48
3.2.1. Matavimo prietaisai transporto srauto dinaminiam procesams tirti .....	48
3.2.2. Matavimo prietaisai transporto priemonių rato ir kelio dangos sąveikos skleidžiamam triukšmui tirti CPX metodu .....	50
3.2.3. Matavimo prietaisai transporto priemonių skleidžiamam triukšmui tirti SPB metodu.....	52
3.3. Transporto srauto dinaminio proceso eksperimentiniai tyrimai .....	53
3.4. Transporto priemonių skleidžiamo triukšmo lygio eksperimentiniai tyrimai .....	57
3.5. Trečiojo skyriaus išvados .....	73
<b>4. TRANSPORTO SRAUTO PARAMETRŲ ĮTAKOS MOMENTINIAM TRIUKŠMO LYGIUI TEORINIO MODELIAVIMO REZULTATŲ ANALIZĖ.....</b>	<b>75</b>
4.1. Modeliuojamo transporto srauto dinaminio proceso tyrimai .....	76
4.2. Šviesoforų signalų trukmės įtaka transporto srauto dinaminiam procesams ir momentiniam triukšmo lygiui.....	77
4.3. Eismo įvykio įtaka transporto srauto dinaminiam procesams ir momentiniam triukšmo lygiui.....	89
4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados .....	96
<b>BENDROSIOS IŠVADOS .....</b>	<b>97</b>
<b>LITERATŪRA IR ŠALTINIAI .....</b>	<b>99</b>
<b>AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS .....</b>	<b>109</b>
<b>SUMMARY IN ENGLISH .....</b>	<b>111</b>
<b>PRIEDAI<sup>1</sup> .....</b>	<b>127</b>
A priedas. Transporto priemonių judėjimas užsidegus žaliajam šviesoforo signalui .	131
B priedas. Autoriaus sąžiningumo deklaracija .....	135
C priedas. Bendra autorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą daktaro disertacijoje.....	136
D priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.....	143

<sup>1</sup> Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

---

# Contents

INTRODUCTION .....	1
Problem formulation .....	1
Relevance of the thesis .....	2
The object of the thesis .....	3
The aim of the thesis .....	3
The tasks of the thesis .....	3
The research methodology .....	4
Scientific novelty of the thesis .....	4
Practical value of the research findings .....	4
Defended statements .....	5
Approval of the research findings .....	5
The structure of the thesis .....	6
Acknowledgements .....	6
1. ANALYSIS OF RESEARCH METHODS FOR TRAFFIC FLOW AND ITS NOISE LEVEL .....	7
1.1. Research methods of traffic flow dynamic processes .....	7
1.1.1. Analysis of discrete traffic flow research methods .....	8
1.1.2. Traffic flow research methods using hydrodynamic equations .....	10
1.1.3. Traffic flow research methods using car-following models .....	12
1.2. Analysis of traffic flow noise research methods .....	17
1.3. Standards and regulations for vehicle noise level research .....	27
1.4. Conclusions of the first chapter and formulation of the tasks of the thesis .....	29

2. MODIFIED DISCRETE TRAFFIC FLOW RESEARCH METHOD AND DEVELOPED INSTANTANEOUS NOISE LEVEL RESEARCH METHODOLOGY .....	31
2.1. Modified discrete traffic flow research .....	31
2.2. Instantaneous noise level research methodology .....	38
2.3. Conclusions of the second chapter .....	42
3. EXPERIMENTAL RESEARCH OF TRAFFIC FLOW DYNAMIC PROCESSES AND ITS NOISE .....	43
3.1. Overview of measuring devices for the research on traffic flow dynamic processes .....	43
3.2. Used measuring devices for traffic flow dynamic process and vehicle noise research .....	48
3.2.1. Measuring device for the research on traffic flow dynamic processes .....	48
3.2.2. Measuring device for the research of vehicle tyre and road surface interaction noise by the CPX method .....	50
3.2.3. Measuring device for the research of vehicle noise emissions by the SPB method .....	52
3.3. Experimental research on traffic flow dynamic processes .....	53
3.4. Experimental research on vehicle noise .....	57
3.5. Conclusions of the third chapter .....	73
4. ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THEORETICAL MODELING RESULTS ON TRAFFIC FLOW PARAMETERS AND THE INSTANTANEOUS NOISE LEVEL .....	75
4.1. Investigation on modeled traffic flows dynamic processes .....	76
4.2. Influence of traffic light signal duration on traffic flow dynamic processes and instantaneous noise level .....	77
4.3. Influence of traffic accident on traffic flow dynamic processes and instantaneous noise level .....	89
4.4. Conclusions of the fourth chapter .....	96
GENERAL CONCLUSIONS .....	97
REFERENCES .....	99
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION .....	109
SUMMARY IN ENGLISH .....	111
ANNEXES <sup>2</sup> .....	127
Annex A. Movement of vehicles, when the traffic light switches to green .....	131
Annex B. Declaration of academic integrity .....	135
Annex C. Co-authors' agreements to present publications material in the doctoral dissertation .....	136
Annex D. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation .....	143

---

<sup>2</sup> The annexes are supplied in the enclosed compact disc

---

# Išvadas

## Problemos formulavimas

Miesto gatvių plėtra ribojama tankaus pastatų ir statinių išdėstymo šalia gatvių. Todėl svarbus vaidmuo tenka transporto srautų (TS) valdymo priemonėms jau esamame gatvių tinkle. Vienas veiksmingiausių TS valdymo būdų yra toks, kai naudojami reguliuojami šviesoforai.

Dabar taikomi deterministiniai šviesoforų ciklo valdymo metodai, pagrįsti iš anksto nustatytais TP koncentracijos prie sankryžų parametrais, t. y. šių parametų vidutinėmis reikšmėmis. Iš tikrųjų TS parametrai (greitis, koncentracija, eismo intensyvumas ir pagreitis) kinta ne tik prie šviesoforų (sankryžų), bet ir visame gatvės ar jos ruožo ilgyje ir turi stochastinį pobūdį. Šie TS parametrai gali pasiekti tokias reikšmes, kurios iš esmės padidina triukšmo lygį. Dauguma modeliavimo metodų nevertina šių staigių TS parametų pokyčių. Gyvenamajai aplinkai mieste vertinti svarbiausios maksimalios triukšmo lygio reikšmės, kurias galima nustatyti matuojant (eksperimentu) arba modeliuojant.

Staigūs TS parametų pokyčiai sukelia TS skleidžiamo triukšmo lygio (TL) staigius svyravimus, kurie ypač jaučiami šalia šių gatvių gyvenančių, dirbančių ar tiesiog esančių žmonių. Naudojamos triukšmo lygio skaičiavimo metodikos leidžia nustatyti vidutines TL reikšmes. Jas taikant neįmanoma nustatyti momentinio triukšmo lygio (MTL).

## Darbo aktualumas

Viename pagrindinių strateginių transporto politikos dokumentų Europos Sąjungos (ES) lygmeniu „Transporto politikos 2011 m. baltoji knyga“ iškeliama aktuali šių laikų aplinkosaugos problema. Šiame dokumente teigiama, kad transporto sektorius tapo švaresnis, tačiau jis toliau auga. Todėl miestai kenčia nuo transporto spūsčių, prasto oro ir triukšmo (Baltoji knyga, 2011).

Naujų TS tyrimo metodų kūrimas ir jų tobulinimas yra svarbūs norint iš anksto numatyti TS kitimo savybes esant skirtingoms eismo sąlygoms. Įvertinant esamas TS (eismo intensyvumo, TP koncentracijos) bei aplinkos sąlygas (leidžiamojo greičio, gatvės laidumo, kelio dangos būklės, meteorologinių sąlygų, kliūčių kelyje), modeliuojant galima nustatyti racionalų TS valdymą, kad būtų pasiektas maksimalus gatvės laidumas.

Dabartinės metodikos, leidžia gauti vidutinės TL reikšmes. Tačiau jos nesuteikia reikiamos informacijos apie TL kitimo priežastis, kintant TS dinaminiam procesams. Svarbu nustatyti, kokiame diapazone kinta TL ir kaip greitai šie pokyčiai vyksta. Todėl siekiama sukurti metodiką, kuri leistų modeliuoti TL bet kuriuo laiko momentu bet kuriame modeliuojamos gatvės mazge. Ją taikant būtų galima teikti siūlymus TS valdymui, siekiant mažinti triukšmo lygį mieste.

## Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – kelių transporto srautų gatvėse, jas supančios aplinkos ir transporto priemonių skleidžiamo momentinio triukšmo lygio sąveika.

## Darbo tikslas

Patobulinti diskretinį transporto srauto tyrimo metodą, leidžiantį įvertinti jų dinaminį procesus, turinčius įtakos skleidžiamam momentiniam triukšmo lygiui miesto gatvėse.

## Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Išanalizuoti transporto srauto dinaminį procesų ir transporto priemonių skleidžiamo triukšmo tyrimo mokslo darbus, metodus ir priemones leidžiančius įvertinti jų galimybes.



2. Atlikti transporto srauto dinaminių procesų eksperimentinius tyrimus, leidžiančius patobulinti diskretinį transporto srauto tyrimo metodą.
3. Pritaikant patobulintą diskretinį transporto srauto tyrimo metodą, įvertinti šviesoforų signalų persijungimo periodo ir eismo įvykių likvidavimo trukmės įtaką transporto srauto dinaminiams procesams.
4. Atlikti transporto srauto skleidžiamo triukšmo lygio eksperimentinius tyrimus, įvertinančius kelio dangos būklę, transporto priemonių važavimo greitį ir kategoriją ir sukurti transporto srauto skleidžiamo triukšmo lygio tyrimo metodiką.
5. Taikant sukurta transporto srauto skleidžiamo triukšmo lygio tyrimo metodiką patobulintam diskretiniam transporto srauto tyrimo metodui, nustatyti transporto srauto skleidžiamą momentinį triukšmo lygį.

## Tyrimų metodika

Darbe taikomas patobulintas diskretinis transporto srauto tyrimo metodas ir sukurta momentinio triukšmo lygio tyrimo metodika. Darbe naudota matematinio modeliavimo ir rezultatų apdorojimo programinė įranga: *Visual Studio – Fortran, Matlab, Brüel & Kjær – Measurement Partner Suite, Microsoft Office*. Transporto srauto eksperimentiniams tyrimams atlikti naudotas TC25 transporto srauto skaitiklis klasifikatorius. Transporto srauto skleidžiamo triukšmo lygio eksperimentiniams tyrimams atlikti naudotas triukšmo analizatorius *Brüel & Kjær 2250*. Padangos ir kelio dangos sąveikos sukeliama triukšmui matuoti naudota Brno transporto tyrimo centro (Čekija) matavimo sistema CPX, grįsta triukšmo matavimo artumo metodu.

## Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją, buvo gauti šie transporto inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Patikslinti diskretinio transporto srauto tyrimo metodo parametrai, kurie gauti atlikus eksperimentinius tyrimus ir kurie leido gauti tikslesnius modeliavimo rezultatus transporto srautui pradedant judėti.
2. Sukurta metodika transporto srauto skleidžiamam momentiniam triukšmo lygiui nustatyti panaudojant eksperimentinių tyrimų ir patobulinto diskretinio transporto srauto tyrimo metodo rezultatus.

3. Taikant patobulintą diskretinį transporto srauto tyrimo metodą ir triukšmo lygio eksperimentinius duomenis, galima nustatyti momentinį triukšmo lygį kiekviename modeliuojamos gatvės mazge su galimybe nustatyti patikslintą vidutinį triukšmo lygį.

## Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Naudojant patobulintą diskretinį transporto srauto tyrimo metodą gauti transporto srauto dinaminį procesų modeliavimo rezultatai gali būti naudojami šviesoforų signalų perjungimo laikui nustatyti įvertinus transporto srauto kitimą bei mažinant transporto srauto skleidžiamo triukšmo lygį. Taip pat, galima nustatyti trumpalaikės kliūties gatvėje poveikį transporto srauto parametrams. Patobulintas diskretinis transporto srauto tyrimo metodas su momentinio triukšmo lygio tyrimo metodika gali būti taikomi miestų transporto srautams valdyti.

## Ginamieji teiginiai

1. Taikant patobulintą diskretinį transporto srauto tyrimo metodą, tiksliau įvertinama transporto srauto dinamika, kai reguliuojant šviesoforus nutraukiamas transporto priemonių eismas. Atlikus transporto srauto eksperimentinius tyrimus, įvertintas transporto priemonių delsimas padidinant susidariusioje transporto priemonių eilėje.
2. Patobulintas diskretinis transporto srauto tyrimo metodas leidžia nagrinėti gatvių tinkle greitai kintančius transporto srautų dinaminį procesą kaip vientisą dinaminę sistemą su kintančiais sistemos parametrais ir nustatyti momentinį triukšmo lygį kiekviename gatvės mazge.
3. Taikant patobulintą diskretinį transporto srauto tyrimo metodą, galima nustatyti galimų eismo įvykių ir kitų trumpalaikių kliūčių įtaką transporto srauto dinamikai ir pakitusiam transporto priemonių eismo intensyvumui skirtinguose gatvės mazguose. Galima prognozuoti, per kiek laiko pašalinus nedidelio eismo įvykio padarinius atsinaujina nusistovėjęs transporto priemonių eismas nagrinėjamame gatvės ruože.
4. Taikant patobulintą diskretinį transporto srauto tyrimo metodą ir triukšmo lygio eksperimentinių tyrimų duomenis, galima nustatyti momentinį triukšmo lygį kiekviename transporto srauto modelio mazge ir nustatyti patikslintas vidutines triukšmo lygio reikšmes, leidžiančias nustatyti efektyvias triukšmo lygio mažinimo priemones valdant transporto priemonių eismą šviesoforais.

## Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema yra išspausdinti 7 moksliniai straipsniai: vienas – mokslo žurnale, įtrauktame į *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazę (Danilevičius *et al.* 2018); du – recenzuojamame mokslo žurnale (Danilevičius, Junevičius 2015; Danilevičius, Bogdevičius 2018), keturi – recenzuojamose tarptautinės konferencijos medžiagoje (Junevičius *et al.* 2015; Danilevičius, Bogdevičius 2017<sup>a</sup>; Danilevičius, Bogdevičius 2017<sup>b</sup>; Danilevičius, Bogdevičius 2020).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti penkiose mokslinėse konferencijose Lietuvoje:

- Tarptautinėje konferencijoje „*Transport Means 2015*“ 2015 m., Kaune.
- Tarptautinėje konferencijoje „*Transbaltica 2017*“ 2017 m., Vilniuje.
- Tarptautinėje konferencijoje „*Vibroengineering*“ 2017 m., Vilniuje.
- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Mokslas – Lietuvos ateitis: Transporto inžinerija ir vadyba*“ 2018 m., Vilniuje.
- Tarptautinėje konferencijoje „*Vision Zero for Sustainable Road Safety in Baltic Sea Region*“ 2018 m., Vilniuje.

## Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai ir bendrosios išvados. Taip pat yra 4 priedai.

Darbo apimtis yra 143 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudotos 65 numeruotos formulės, 64 paveikslai ir 8 lentelės. Rašant disertaciją, buvo panaudoti 108 literatūros šaltiniai.

## Padėka

Norėčiau padėkoti savo moksliniam vadovui prof. habil. dr. Marijonui Bogdevičiui už kantrybę, vertingas mokslines konsultacijas ir patarimus bei visokeriopą pagalbą. Esu labai dėkingas prof. habil. dr. Henrikui Sivilevičiui už vertingus patarimus. Taip pat esu labai dėkingas savo mokslinės stažuotės Čekijoje vadovui Vitezslav Krivanek ir visiems transporto tyrimų centro darbuotojams už šiltą priėmimą, vertingus patarimus ir galimybę atlikti eksperimentinius tyrimus. Nuoširdžiai dėkoju visiems Mobilijų mašinų ir geležinkelių transporto katedros darbuotojams už palaikymą ir vertingus patarimus. Ne mažiau dėkingas esu šeimai už palaikymą, supratingumą ir kantrybę.



---

# Transporto srauto ir jo skleidžiamo triukšmo lygio tyrimo metodų analizė

Šiame skyriuje pateikiama mokslinių darbų apžvalga. Nagrinėjama mokslinė literatūra, kurioje taikomi TS dinaminių procesų ir TL tyrimų metodai. Pateikti eksperimentinių tyrimų atlikimo standartai, kurie buvo naudojami TL tirti.

Skyriaus tematika paskelbta viena autoriaus publikacija kartu su bendraautoriais (Danilevičius *et al.* 2015).

## 1.1. Transporto srauto dinaminių procesų tyrimo metodai

TS modeliavimas gali būti atliekamas mikro- ir makrometodais (Ou *et al.* 2018). TS mikromodeliavimu galima tiksliau sekti atskirų TP judėjimą, tačiau tokius metodus sudėtinga pritaikyti didesnių gatvių tinklų problemoms spręsti. TS makromodeliavimu TS neskaidomas į atskiras TP, todėl greičiau atliekami skaičiavimai, kai yra didesnis gatvių tinklas, bet nevertinama atskirų TP įtaka TS.

Didžiausias TS miestų gatvėse pastebimas rytinio piko metu, kuris trunka nuo 7:30 val. iki 8:15 val. Kaune (Jablonskytė *et al.* 2011) ir nuo 7:30 val. iki 8:30 val.

Vilniuje (Burinskienė *et al.* 2009). Todėl modeliuojant TS, svarbu įvertinti tuo metu esamas eismo sąlygas.

### 1.1.1. Diskretinių transporto srauto tyrimo metodų analizė

Rathi (1997) teigia, kad yra du galimi diskretinio modeliavimo būdai, priklausantys nuo to, ar laiko intervalai yra fiksuoti, ar kintantys: diskrečiojo laiko ir diskrečių įvykių.

Diskrečiojo laiko modeliavimas – tai TS modeliavimas, atliekamas suskirstant į fiksuotus laiko intervalus. Pavyzdžiui, metodas leidžia skaičiuoti automobilio vietą sraute, greitį ir pagreitį 1 sekundės intervalais. Pasirinktas laiko intervalo dydis priklauso nuo to, kaip tiksliai reikia sistemą imituoti atsižvelgiant į kompiuterio apdorojimo laiko galimybes. Dauguma mikrosimuliacijų modeliuojama 0,1 s laiko intervalais. TS paprastai modeliuojami taikant diskrečiojo laiko metodus, nes nuolat keičiasi TS dinaminiai procesai.

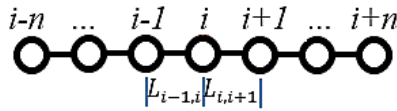
Diskrečių įvykių modeliavimo metoduose laiko intervalai imami skirtingo ilgio ir jie atitinka intervalus tarp įvykių. Pavyzdžiui, išankstinė šviesoforo signalo identifikacija (pvz., žalias šviesoforo signalas) išlieka pastovi 30 s, kol jos būseną akimirksniu pasikeičia į geltoną šviesoforo signalą. Šviesoforo signalų kitimo laikas nurodo skirtingus laiko intervalus, kai įvykis įvyksta, o ne stebint būseną kiekvieną sekundę. Diskrečių įvykių metodai paprastai gerokai sumažina skaičiavimo trukmę, tačiau jie tinka modeliuoti TS, kurių eismo intensyvumas labai mažas.

Pagrindinė TS „atkūrimo“ koncepcija grindžiama diskretinis nedeterminuotas modelis, kuris leidžia nustatyti TP skaičių TS bet kuriame tiriamame gatvės mazge bet kuriuo laiko momentu, pateiktas (1.1) formule (Van *et al.* 2015):

$$k(m, n+1) \approx \frac{N_{auto,e}(m-1, n) + N_{auto,e}(m+1, n)}{2}, \quad (1.1)$$

čia  $k(m, n)$  funkcija ( $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ;  $n=0, 1, 2, \dots$ ), suteikiant TP skaičių  $n$  laiko momentu  $\Delta t$  mazge  $m$  su koordinatėmis  $\Delta x$ .  $\Delta$  nurodo parametrų pokytį.

Mokslininkų (Junevičius, Bogdevičius 2009; Junevičius 2011; Bogdevičius, Junevičius 2014) sukurtas diskretinis transporto srauto tyrimo metodas (DTSTM) naudoja lygčių sistemą, kurioje atsižvelgiama į du parametrus: TP koncentraciją ir greitį. Šie parametrai yra skaičiuojami kiekviename gatvės mazge ir atsižvelgiama į koncentracijos ir greičio duomenis iš ankstesnio ir tolesnio tam tikro gatvės mazgo (1.1 pav.). Taikant šį metodą, modeliuojama gatvė padalijama į tam tikro ilgio elementus, 1.1 paveiksle pažymėtus simboliu  $L$ . Šių elementų ilgis pasirenkamas pagal siekiamo modeliavimo tikslumą. Kuo  $L$  elementai trumpesni, tuo tikslesni rezultatai gaunami. Mazgai  $i$  jungia gretimus gatvės elementus. Mazgų koordinatė aprašoma pridodant ar atimant  $n$ -tąjį mazgą.



**1.1 pav.** Schema transporto srauto parametrų vertėms gauti kiekviename gatvės mazge  
**Fig. 1.1.** Schematic representation of traffic flow values at each node on the street

Kiekvienam gatvės mazgui  $i$  pateiktos (1.2, 1.3) lygtys. (1.2) lygtis aprašo TS greičio kitimą, o (1.3) lygtis aprašo TP koncentracijos kitimą kiekviename gatvės mazge  $i$ :

$$\dot{v}_i = \sum_{j=1}^{N_{in}} p_{in,i,j}(t) r_{v_i,in,i,j} \Phi_{v,in,i,j} \left( k_j(t - \tau_{i,j}), v_j(t - \tau_{i,j}), k_i(t), v_i(t) \right) v_i(t) - \sum_{j=1}^{N_{out}} p_{out,i,j}(t) r_{v_i,out,i,j} \Phi_{v,out,i,j} \left( k_i(t), v_i(t), k_j(t), v_j(t) \right) v_i(t); \quad (1.2)$$

$$\dot{k}_i = \sum_{j=1}^{N_{in}} p_{in,i,j}(t) r_{k_i,in,i,j} \Phi_{k,in,i,j} \left( k_j(t - \tau_{i,j}), v_j(t - \tau_{i,j}), k_i(t), v_i(t) \right) k_i(t) - \sum_{j=1}^{N_{out}} p_{out,i,j}(t) r_{k_i,out,i,j} \Phi_{k,out,i,j} \left( k_i(t), v_i(t), k_j(t), v_j(t) \right) k_i(t), \quad (1.3)$$

čia  $k_i(t)$  – TP koncentracija  $i$ -tame gatvės mazge;  $v_i(t)$  – TS greitis  $i$ -tame gatvės mazge;  $p_{in,i,j}$ ,  $p_{out,i,j}$  – TS suskaidymo ar sujungimo tam tikrame gatvės mazge tikimybė  $i, j$ ;  $r_{k_i,in,i,j}$ ,  $r_{k_i,out,i,j}$ ,  $r_{v_i,in,i,j}$ ,  $r_{v_i,out,i,j}$  – DTSTM koeficientai;  $\Phi_{k,in,i,j} \left( k_j(t - \tau_{i,j}), v_j(t - \tau_{i,j}), k_i(t), v_i(t) \right)$ ;  $\Phi_{k,out,i,j} \left( k_i(t), v_i(t), k_j(t), v_j(t) \right)$ ;  $\Phi_{v,in,i,j} \left( k_j(t - \tau_{i,j}), v_j(t - \tau_{i,j}), k_i(t), v_i(t) \right)$ ;  $\Phi_{v,out,i,j} \left( k_i(t), v_i(t), k_j(t), v_j(t) \right)$  – diskretinio transporto srauto modelio nelineinės funkcijos;  $N_{in}$ ,  $N_{out}$  – eismo juostų skaičius, kurios įeina ir išeina  $i$ -tame gatvės mazge.

TP skaičius kiekviename gatvės elemente yra skaičiuojamas pagal (1.4) formulę:

$$N_{auto,e} = \int_{x_i}^{x_j} k(x) dx, \quad (1.4)$$

čia  $x_{i,j}$  – gatvės elementų ribos;  $k_{i,j}$  – TP koncentracija gatvės elemento ribose.

Bendras TP skaičius gatvėje laiko momentu  $t$  yra skaičiuojamas pagal (1.5) formulę:

$$N_{total}(t) = \sum_{e=1}^{N_e} N_{auto,e}, \quad (1.5)$$

čia  $N_e$  – gatvės elementų skaičius.

DTSTM aprašant TP koncentracijos ir greičio kitimo modeliuojamos gatvės mazge naudojami pastovūs  $r_{k_i, in, i, j}$ ,  $r_{k_i, out, i, j}$ ,  $r_{v_i, in, i, j}$ ,  $r_{v_i, out, i, j}$  koeficientai lygtyse, kurie priimti kaip pastovūs metodo parametrai.

### 1.1.2. Transporto srauto tyrimo metodai panaudojant hidrodinamikos lygtis

Hidrodinaminis TS tyrimo metodas paremtas patobulintomis hidrodinaminėmis lygtimis, skirtomis skysčio tekėjimui aprašyti, jas pritaikant TS dinaminiams procesams modeliuoti. Pirmasis hidrodinaminis TS tyrimo metodas pasiūlytas Nagatani (1998), išreikštas (1.6 ir 1.7) lygtimis, kurias savo tyrimuose naudoja ir kiti autoriai, tokie kaip Zhang *et al.* (2019), Jiang *et al.* (2018), Zhang (2018), Zhao *et al.* (2018), Peng *et al.* (2018), Sun *et al.* (2018), Peng *et al.* (2019), Wang *et al.* (2019<sup>a</sup>), Wang *et al.* (2019<sup>b</sup>), Wang *et al.* (2019<sup>c</sup>):

$$\mathcal{G}_t k_j + k_{vid} (k_j v_j - k_{j-1} v_{j-1}) = 0, \quad (1.6)$$

$$\mathcal{G}_t (k_j v_j) = a k_{vid} v_{opt} (k_{j+1}) - a k_j v_j, \quad (1.7)$$

čia  $k_j$  ir  $v_j$  – TP koncentracija (aut./m) ir greitis (m/s) gatvės elemente  $j$  laiko momentu  $t$ ;  $k_{vid}$  – vidutinė TP koncentracija (aut./m);  $a$  – vairuotojo reakcijos jautrumo koeficientas;  $v_{opt}$  – optimalus TS greitis, kuris gaunamas iš (1.8) lygties:

$$v_{opt} (k_j) = \frac{v_{max}}{2} \left( \tanh \left( \frac{1}{k_j} - \frac{1}{k_{max}} \right) + \tanh \left( \frac{1}{k_{max}} \right) \right), \quad (1.8)$$

čia  $v_{max}$  – maksimalus TS greitis (m/s);  $k_{max}$  – maksimali TP koncentracija (aut./m).

Tobulinant hidrodinaminį TS tyrimo metodą, jį galima pritaikyti įvairioms situacijoms modeliuoti. Liu *et al.* (2016) nagrinėja TP koncentracijos kitimą vienoje eismo juostoje pritaikant hidrodinaminį TS tyrimo metodą, pagrįstą spūsčių valdymo schema. Šiuo atveju į nagrinėjamą TS įvedamas papildomas kontroliuojamas TS ir stebimi rezultatai, t. y. valdomas tik vienas gatvės elementas, joje koreguojant TS parametrus. Taikant šį metodą, nusistovėjusio TP eismo rezultatai matomi tik po 200 s. Taip pat optimizavimui naudojamas genetikos algoritmas. Tian *et al.* (2011), Gupta, Redhu (2013<sup>b</sup>) ir Shu-Hong *et al.* (2016) naudojamas patobulintas Nagatani (1998) hidrodinaminis TS tyrimo metodas, kuriuo parenkamas optimalus TS judėjimo greitis, įvertinant TS parametrų skirtumo informaciją tarp stebimo faktinio TS ir nustatyto optimalaus TS vienoje eismo juostoje. Rezultatai gaunami keičiant reagavimo jautrumą į pakitusių TS parametrų skirtumą.



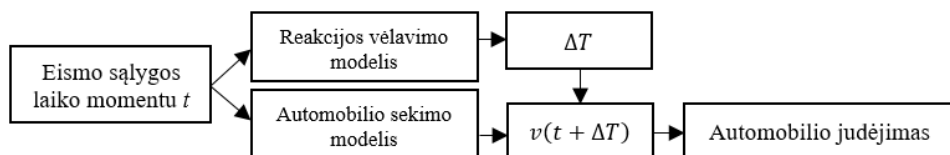
Kuo didesnis nustatytas jautrumas, tuo stabilesnis TS kelyje. Wang *et al.* (2017) ir Zhu *et al.* (2017) hidrodinaminį TS tyrimo metodą papildė uždelsto grįžtamojo ryšio kontrolės strategija, kur, atsižvelgiant į valdymo signalą, nustatomas optimalus TS judėjimo greitis. Kaur, Sharma (2016) nagrinėja TS parametrus, esant skirtingo spindulio gatvės vingiams, taikant hidrodinaminį TS tyrimo metodą ir vertinant vairuotojų elgesį. Atlikus tyrimus, gauta, kad, esant kelio vingiams, yra neigiama įtaka TS stabilumui. Analizuojant vairuotojų agresyvaus vairavimo įtaką, taip pat gaunama neigiama įtaka TS stabilumui, kai vairuotojai elgiasi agresyviai. Tačiau kai yra vertinamas vairuotojų vairavimo agresyvumas ir įtraukus į modelį kelio vingius, gaunamas didesnis TS stabilumas. Peng (2013) ir Gupta, Redhu (2013<sup>a</sup>) pateikė patobulintą Nagatani hidrodinaminį TS tyrimo metodą, kuris papildytas lygtimis, aprašančiomis dviejų eismo juostų sąveiką. Čia TP gali keisti eismo juostą pagal optimalų TP koncentracijos skirtumą eismo juostose. TP gali keisti eismo juostą, jei jos judėjimo juostoje TP koncentracija yra didesnė nei gretimoje eismo juostoje. Taikant šį metodą, didesnė reakcijos į TP koncentracijos skirtumą koeficiento reikšmė sumažina TS parametrų svyravimus. Didžiausi TP koncentracijos svyravimai gaunami, kai TP neturi galimybės keisti eismo juostos. Wang *et al.* (2014) taikydami tą patį metodą nustatė, kad nors ir gaunamas didžiausias TP koncentracijos stabilumas, bet tuo pačiu TS greitis yra mažiausias. Li *et al.* (2015<sup>a</sup>) hidrodinaminio TS tyrimo metodu nagrinėja agresyvių vairuotojų manevravimą tarp dviejų eismo juostų. Peng *et al.* (2015), taikydamas hidrodinaminį TS tyrimo metodą dviem eismo juostoms, atliko skaičiavimus, vertindami TS nutraukimo tikimybę, kuri būna naudojant raudoną šviesoforo signalą. Gauti rezultatai rodo, kad TP koncentracijos nestabilumą, kurį sukelia TS nutraukimas, galima sumažinti keičiant reakcijos laiką į TP koncentracijos skirtumą atskirose eismo juostose. Jin-Liang *et al.* (2016) hidrodinaminis TS tyrimo metodas papildytas lygtimis optimaliam TS greičiui nustatyti, įvertinus važiavimą įkalne ar nuokalne. Nustatyta, kad esant tam pačiam reakcijos laiko koeficientui į TP koncentracijos skirtumą atskirose eismo juostose, bet skirtingam įkalnės kampui, gaunama labai didelė įtaka TP koncentracijos stabilumui kelyje.

Lee, Wong (2017) aprašo šviesoforų signalų perjungimo vertinant TS keliose skirtingose eismo juostose metodą. Jie išskėlė problemą dėl valdymo signalų delsimo. Tam tikslui nustatyti pataisos koeficientai, siekiant identifikuoti delsimo charakteristikas šviesoforo cikle. Naudojamas Kalmano filtras. Kalmano sistemos parametrai aprašo santykinius pataisos koeficientus pagal stovinčiųjų TP eilių ilgį prieš sankryžos tarp  $(n-1)$ -ojo šviesoforo ciklo ir  $(n+x)$ -ojo šviesoforo ciklo.

### 1.1.3. Transporto srauto tyrimo metodai panaudojant sekimo paskui lyderį modelius

Sekimo paskui lyderį modelis (angl. *car-following model*), naudojamas nustatyti, kaip TP seka viena kitą kelyje. Naweel (2002) teigia, kad pagrindinė šio modelio idėja yra ta, kad TP išlaiko minimalų erdvės ir laiko tarpą tarp jos ir prieš ją esančios TP. Taigi, esant spūstims, jei priekyje važiuojanti TP keičia greitį, tai ir iš paskos važiuojanti TP keičia greitį tam tikru laiko momentu išilgai gatvės sukuriant greičio kitimo bangą.

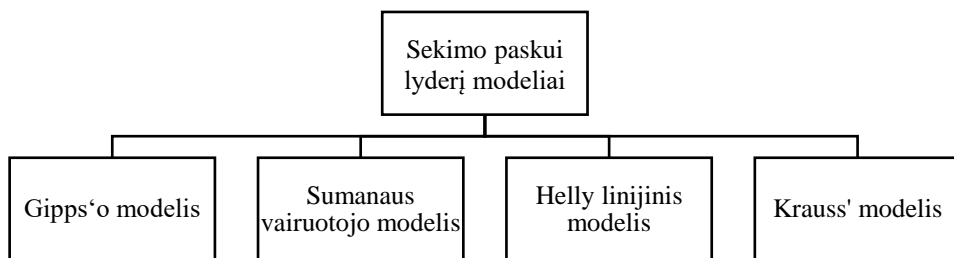
Sekimo paskui lyderį modeliai gali padėti geriau organizuoti realius TS, efektyviau išnaudojant gatvės plotą sumažinant atstumus tarp TP iki saugaus atstumo ir tuo pačiu padidinant TS eismo intensyvumą. Taip galima sumažinti eismo spūstis.



**1.2 pav.** Transporto priemonių judėjimo paskui kitą transporto priemonę modelio veikimo principo blokinė schema (Zheng *et al.* 2013)

**Fig. 1.2.** Car-following model operating principle block diagram (Zheng *et al.* 2013)

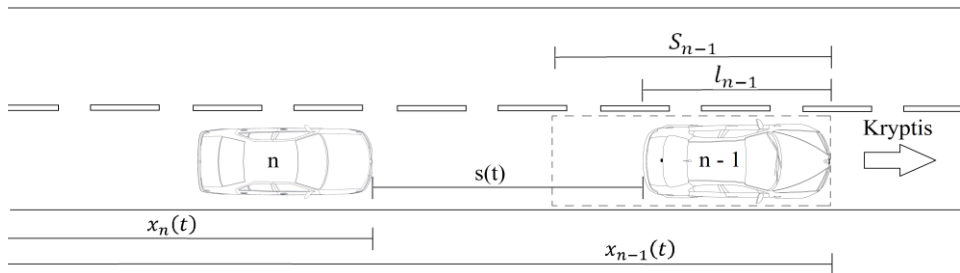
Plačiausiai naudojami sekimo paskui lyderį modeliai pateikti 1.3 paveiksle. Visi šie modeliai pasižymi bendru principu, kuris modelyje leidžia nustatyti atskirų TP judėjimą. Tai leidžia nustatyti kokios sąlygos turi įtakos atskirų TP judėjimui. Tačiau šie modeliai nėra tinkami didelio gatvių tinklo tyrimams, dėl didelio duomenų kiekio, skirto atskiroms transporto priemonėms.



**1.3 pav.** Sekimo paskui lyderį modeliai

**Fig. 1.3.** Car-following models

Pirmasis modelis, pagrįstas saugaus atstumo sąvoka, sukurtas Kometani ir Sasaki (1959). Už priešais važiuojančios TP vairuotojas pasirenka savo greitį pagal saugų atstumą, kad būtų išvengta galimo susidūrimo su priekyje važiuojančia TP (1.2 pav.). Vėliau Gipps (1981) modifikavo šį modelį, kuris gali būti kalibruojamas atsižvelgiant į vairuotojo elgesį, pvz., pasirinktą greitėjimo ir lėtėjimo TP pagreitį, maksimalų greitį. Šio modelio TP pagreičio ir saugaus atstumo iki priekyje važiuojančios TP reikšmės yra pastovios, o kalibruojamos gali būti reakcijos laiko, stabdymo pagreičio, didžiausio norimo greičio reikšmės (Ranjitkar *et al.* 2005).



**1.4 pav.** Transporto priemonių judėjimo paskui kitą transporto priemonę modelis (Zheng *et al.* 2013)

**Fig. 1.4.** Car-following model (Zheng *et al.* 2013)

Osorio, Punzo (2019), Hammit *et al.* (2019), Wang *et al.* (2017), Astarita *et al.* (2019), Zhua *et al.* (2018), Yanga *et al.* (2018), Yaoa *et al.* (2018), Ni (2016), Saifuzzaman, Zheng (2015), Papathanasopoulou, Antoniou (2015) pateikia Gipps'o modelį (angl. *Gipps model*), naudojamą įvairiuose mikroskopiniuose imitaciniuose modeliuose. Modelis rodo, kad TP  $n$  (1.4 pav.) greitis priklauso nuo trijų apribojimų. Pirmasis apribojimas TP  $n$  greičiui, kuris riboja vairuotojo pasirinktą greitį  $v_n$ . Antrasis – TP greitai išibėgėja iki norimo greičio ir tada pagreitis sumažinamas beveik iki nulio. Jei dvi TP yra toli viena nuo kitos, jos elgiasi kaip laisvame TS. Šios dvi sąlygos sujungiamos lygtyje (1.10). Trečiuoju – atsižvelgiama į atstumą  $s(t)$  tarp TP ir veikiamą sekėjo vairavimo elgseną, kol pastarasis lėtėja. Tai savaime suprantama, kad sekėjo TP greitis bus koreguojamas, kad būtų išlaikytas saugus atstumas nuo lyderio TP. Ši sąlyga aprašyta antroje lygtyje. Tarpas tarp automobilių  $s(t)$  iš schemos (1.4 pav.) apskaičiuojamas pagal (1.9) formulę:

$$s(t) = x_{n-1}(t) - l_{n-1} - x_n(t), \quad (1.9)$$

čia  $x_n(t)$  – TP  $n$  priekio padėtis laiko momentu  $t$ , m;  $x_{n-1}(t)$  – TP  $n-1$  priekio padėtis laiko momentu  $t$ , m;  $l_{n-1}$  – fizinis TP  $n-1$  ilgis, m.

Atsižvelgiant į minėtus tris apribojimus, TP  $n$  greitis laiko momentu  $t$  gali būti apskaičiuojamas pagal formulę (1.10):

$$v_n(t) = \min \left\{ \begin{array}{l} v_n(t) + 2,5a_{\max}\tau \left(1 - \frac{v_n(t)}{v_{\max}}\right) \sqrt{0,025 + \frac{v_n(t)}{v_{\max}}} \\ b_{\max}\tau + \sqrt{b_n^2\tau^2 - b_{\max} \left(2(x_{n-1}(t) - S_{n-1} - x_n(t)) - v_n(t)\tau - \frac{v_{n-1}(t)^2}{\hat{b}}\right)} \end{array} \right\}, (1.10)$$

čia  $a_{\max}$  – maksimalus TP greitėjimo pagreitis, kurį vairuotojas  $n$  pasirenkęs atlikti, m/s<sup>2</sup>;  $b_{\max}$  – maksimalus TP lėtėjimo pagreitis, kurį vairuotojas  $n$  pasirenkęs atlikti, m/s<sup>2</sup>;  $\hat{b}$  – maksimalus apskaičiuotas TP  $n-1$  lėtėjimo pagreitis TP  $n$  atžvilgiu, m/s<sup>2</sup>;  $S_{n-1}$  – efektyvus TP  $n-1$  ilgis, m. Jis apima fizinį TP  $n-1$  ilgį  $l_{n-1}$ , m ir saugaus atstumo ribą  $s^*$ , m, kurios vairuotojas  $n$  neturi kirsti, m;  $v_{\max}$  – maksimalus norimas TP greitis, m/s;  $v_n(t)$  – TP  $n$  greitis laiko momentu  $t$ , m/s;  $v_{n-1}(t)$  – TP  $n-1$  greitis laiko momentu  $t$ , m/s;  $\tau$  – vairuotojo reakcijos laikas, kuris yra konstanta visoms TP ir lygus matavimo žingsniui, s.

Kim, Mahmassani (2011) pateikia apskaičiuojamo TP lėtėjimo pagreičio dedamąsias. Lėtėjimo pagreitį  $\hat{b}$  sudaro maksimalaus pageidaujamo lėtėjimo pagreičio ( $b_{\max} < 0$ , m/s<sup>2</sup>) ir koeficiento  $\alpha$  sandauga. Kai  $\alpha < 1$ , TP  $n$  lėtėjimas nepakankamas ir tampa agresyvus, o kai  $\alpha > 1$ , lėtėjimas atsargesnis.

Naudojant Gipps'o modelį, TP greitis parenkamas visada mažesnis iš lygtyje (1.10) gaunamų dviejų alternatyvių greičių. Tokiu būdu TP  $n$  greitis negali viršyti norimo maksimalaus greičio arba negali viršyti lyderio TP  $n-1$  greičio (Ciuffo *et al.* 2012). Šis metodas įvertina sąveiką tarp TP, esančių toje pačioje eismo juostoje be galimybės aplenkti priekyje esančios TP.

Kitas sekimo paskui lyderį modelis, kurį Li *et al.* (2015<sup>b</sup>), Derbel *et al.* (2012), Derbel *et al.* (2013), Kesting (2010) autoriai pateikia kaip tinkamą apibūdinti atskirų TP ir vairuotojų elgseną diferencialinėmis lygtimis. Modelis vadinamas sumanaus vairuotojo modeliu (angl. *Intelligent Driver Model*). Modeliu TP  $n$  pagreitis laiko momentu  $t$  (1.15) yra nustatomas pagal esamą TP greitį laiko momentu  $t$ , atstumą tarp TP  $s(t)$  ir efektyvaus norimo (saugaus) atstumo tarp TP (1.11):

$$s_{ns}(t) = s^* + \left( v_n(t)t_{n,n-1} + \frac{v_n(t)\Delta v_n(t)}{2\sqrt{a_{\max}b_{\max}}} \right), (1.11)$$

čia  $s^*$  – saugaus atstumo riba, kurios vairuotojas  $n$  neturi kirsti, m;  $v_n(t)$  – TP  $n$  greitis laiko momentu  $t$ , m/s;  $t_{n,n-1}$  – pastovus laiko tarpas tarp TP;  $\Delta v_n(t)$  – TP greičių skirtumas;  $a_{\max}$  – maksimalus TP greitėjimo pagreitis, kurį vairuotojas  $n$  pasirengęs atlikti, m/s<sup>2</sup>;  $b_{\max}$  – pasirinktas norimas TP lėtėjimo pagreitis, m/s<sup>2</sup>.

TP greičių skirtumas  $\Delta v_n(t)$  užrašomas (1.12) lygtimi:

$$\Delta v_n(t) = v_n(t) - v_{n-1}(t), \quad (1.12)$$

čia  $v_{n-1}(t)$  – TP  $n-1$  greitis laiko momentu  $t$ , m/s.

Kesting *et al.* (2010) akcentuoja, kad sumanaus vairuotojo modelis sujungia TP greitėjimo pagreičio (1.13) laisvoje gatvėje

$$a(t) = a_{\max} \left( 1 - \left( \frac{v_n(t)}{v_{\max}} \right)^{\delta} \right) \quad (1.13)$$

ir TP stabdymo pagreičio (1.14) strategijas.

$$a_s(t) = -a_{\max} \left( \frac{s_{ns}(t)}{s(t)} \right)^2. \quad (1.14)$$

čia  $\delta$  – TP pagreičio eksponentė;  $v_{\max}$  – pasirinktas TP greitis, m/s;  $s_{ns}(t)$  – efektyvus saugus atstumas tarp TP, m;  $s(t)$  – esamas atstumas tarp TP, m.

Vertinant pastarąsias dvi (1.13) ir (1.14) TP pagreičių strategijas, gaunamas sekėjo TP pagreitis  $a_n(t)$ :

$$a_n(t) = a_{\max} \left( 1 - \left( \frac{v_n(t)}{v_{\max}} \right)^{\delta} - \left( \frac{s^* + \left( v_n(t)t_{n,n-1} + \frac{v_n(t)(v_n(t) - v_{n-1}(t))}{2\sqrt{a_{\max}b_{\max}}} \right)}{s(t)} \right)^2 \right). \quad (1.15)$$

Pagreičio eksponentė  $\delta$  charakterizuoja, kaip TP pagreitis mažėja su greičiu ( $\delta=1$  atitinka tiesinį mažėjimą, kai  $\delta \rightarrow \infty$  reiškia pastovų TP pagreitį). Kesting *et al.* (2010) pateikia, kad paprastai eksponentės  $\delta$  reikšmė pasirenkama lygi 4. Autoriaus teigimu, šis metodas leidžia parinkti norimą TP greitį įvertinant saugų laiko tarpą, kuris reikalingas, kad TP  $n$  be susidūrimo su lyderio TP saugiai sustotų. Tačiau neįvertinamas vairuotojo reakcijos laikas.

Chang, Chon (2005), Lázaro *et al.* (2018), Kendziorra *et al.* (2016), Li, Sun (2012), Saifuzzaman *et al.* (2014), Li *et al.* (2016), Hong *et al.* (2009), Yang, Peng (2009) pateikia Helly linijinį modelį (angl. *Helly linear model*), kuris taiko papildomas sąlygas parenkant transporto priemonės pagreitį (1.16), atsižvelgiant į tai, ar priekyje esanti lyderio transporto priemonė buvo stabdoma.

$$a_n(t) = C_1 \{ [v_{n-1}(t - \tau) - v_n(t - \tau)] + C_2 [x_{n-1}(t - \tau) - x_n(t - \tau) - s_n(t)] \}, \quad (1.16)$$

čia  $C_1$  – santykinio TP greičio konstanta;  $C_2$  – atstumo tarp TP konstanta;  $s_n(t)$  – atstumas tarp TP laiko momentu  $t$ , m.

Konstantos  $C_1$  ir  $C_2$  koreguoja santykinį TP greitį ir atstumą tarp TP.

Atstumas tarp TP laiko momentu  $t$  apskaičiuojamas pagal (1.17) formulę:

$$s_n(t) = (d^* + l_{n-1}) + \gamma v_n(t - \tau), \quad (1.17)$$

čia  $d^*$  – pasirinktas TP visiško sustojimo atstumas iki lyderio TP, m;  $\gamma$  – konstanta, koreguojanti TP greitį esant pasirinktam atstumui tarp TP laiko momentu  $t$ .

Taniguchi *et al.* (2015) pateikia sąlygą parenkant konstantą  $\gamma$  (1.18), tinkančią TP greičiui pakoreguoti, kad pavijus priekyje važiuojančią lyderio TP  $n-1$ , abiejų TP greitis kuo tiksliau sutaptų, siekiant išvengti greičio svyravimų:

$$\gamma \geq \frac{-C_1 + \sqrt{C_1^2 + 2C_2}}{C_2}. \quad (1.18)$$

Helly linijinis modelis suteikia galimybę su papildomomis koeficientų  $C_1$ ,  $C_2$  ir  $\gamma$  korekcijomis pritaikyti TP  $n$  pagreitį priklausomai nuo pakitusių sąlygų kelyje, pvz., esant slidžiai dangai ar prastam matomumui.

Krajzewicz *et al.* (2005), Yuana *et al.* (2015), Walz *et al.* (2017), Kendziorra *et al.* (2016) pateikto Krauss'o modeliu (angl. *Krauss model*) pirmiausiai apskaičiuojamas saugus greitis  $v_s(t)$  (1.19), kuris leidžia laikytis saugiu atstumu iki lyderio TP  $n-1$  ir prisitaikyti prie jo TP lėtėjimo pagreičio  $b_n$ .

$$v_s(t) = v_{n-1}(t) + \frac{s(t) - v_{n-1}(t)\tau}{\frac{v_n(t) + v_{n-1}(t)}{2b_{\max}} + \tau}. \quad (1.19)$$

Tada nustatomas TP greitis laiko momentu  $t$  (1.20). Pasirenkama mažiausia TP greičio reikšmė iš apskaičiuoto saugaus greičio, norimo greičio ir esamo greičio įvertinant maksimalų pagreitį, kurį vairuotojas  $n$  pasirengęs atlikti.

$$v_n(t) = \min\{v_s(t), v_n(t) + a_{\max}, v_{\max}\}. \quad (1.20)$$

Ir pasirenkamas TP greitis  $v_n(t + \tau)$ . Papildomai įvedama 0 km/h sąlyga (1.21), kad TP nejudėtų atbulomis, kai priartėjama per arti priekyje esančios TP.

$$v_n(t + \tau) = \max\{0, v_n(t) - \varepsilon a_{\max}\}, \quad (1.21)$$

čia  $\varepsilon$  – koeficientas, sumažinantis jautrumą greičio pokyčiams tam, kad TP judėjimo greitis būtų tolygus.

Šis modelis suteikia galimybę įvertinti vairuotojo netolygų norimo greičio išlaikymą ir saugų atstumą tarp TP, įskaitant ir vairuotojo reakcijos laiką.

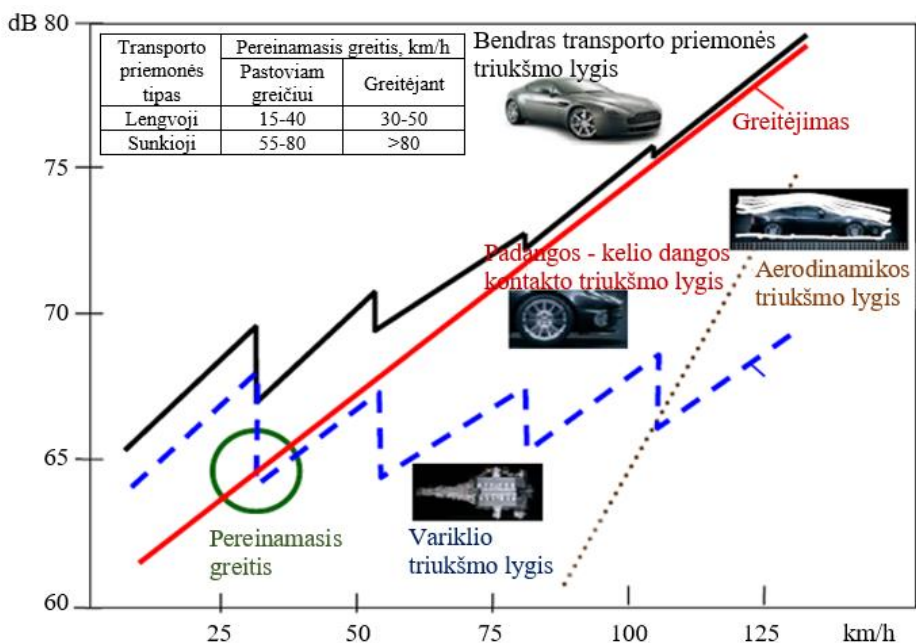
Hjelkrem *et al.* (2016) nagrinėjamas vairuotojų rizikos suvokimas esant skirtingoms kritulių, apšvietimo ir kelio būklės sąlygoms. Čia rodiklis CRI (angl. *Choised risk index*) – pasirinktas rizikos indeksas. Palyginamas lengvųjų ir sunkiųjų TP vairuotojų suvokimas dėl rizikos lygio. Nustatyta, kad lengvųjų TP vairuotojams daro įtaką oro sąlygos, kelio dangą ir matomumas, o sunkiųjų TP vairuotojams įtakos turi sniegas, bet krituliai praktiškai neturi įtakos. CRI indeksas siūlomas naudoti sekimo paskui lyderį modeliuose. Hamdar *et al.* (2016) panaudojo eksperimentinius duomenis ir juos apdorojo genetiniu algoritmu. Pasinaudoję „STISIM Drive simulator“ programa, nustatė TP greitį esant įvairioms sąlygoms. Vertinami kelio parametrai, tokie kaip sukibimas su kelio dangą, esant apledėjimui ar šlapiai kelio dangai. Taip pat vertinamos oro sąlygos, kurios turi įtakos matomumui.

## 1.2. Transporto srauto skleidžiamo triukšmo tyrimo metodų analizė

Triukšmas yra nepageidaujamas garsas, jo intensyvumas („garsumas“) matuojamas decibelais (dB). Decibelų skalė yra logaritminė, todėl garso lygiui padidėjus keliais decibelais triukšmo intensyvumas padvigubėja.

Svarbiausi triukšmo šaltiniai, turintys įtakos TS bendram TL, yra TP, kurios atskiri triukšmo šaltiniai iliustruoti 1.5 paveiksle (Rasmussen *et al.* 2008).

Atskiri TP mazgai, kaip triukšmo šaltiniai, vienas už kitą tampa triukšmingesni, esant skirtingam TP greičiui. Rasmussen *et al.* (2008) nustatė, kad esant nedideliame greičiui (lengvosioms TP iki 15–40 km/h, sunkiosioms iki 55–80 km/h) (Jacyna *et al.* 2017), TP variklio triukšmingumas yra didesnis už padangos ir kelio dangos sąveikos triukšmą. Didėjant TP greičiui, padangos ir kelio dangos sąveikos TL tampa svarbesnis bendram TL. Kai TP važiuoja didesniu kaip 80 km/h greičiu, bendrą TL didina aerodinaminis TL.



**1.5 pav.** Lengvųjų transporto priemonių triukšmo lygio, atsirandančio dėl padangų ir kelio dangos sąveikos, variklio ir aerodinaminio triukšmo, esant pastoviam greičiui, įvertinimas (Rasmussen *et al.* 2008)

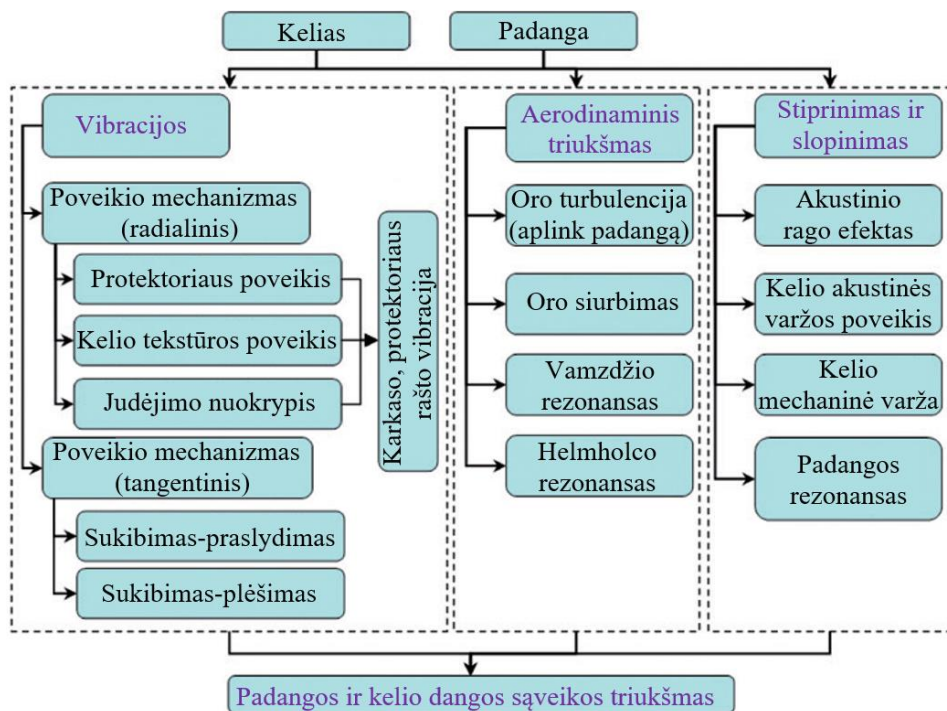
**Fig. 1.5.** An estimate of light vehicle noise due to tyre-pavement interaction, powertrain noise, and aerodynamic noise at cruise speed (Rasmussen *et al.* 2008)

Bazaras *et al.* (2008) išskyrė tris TP skleidžiamo triukšmo tipus: transporto priemonės sistemos keliamą triukšmą, riedėjimo triukšmą ir triukšmą, atsirandantį dėl vairuotojo veiksmų. Transporto priemonėje triukšmas sklinda iš variklio, pavaru dėžės, išmetimo sistemos, važiuoklės ir ratų. Riedėjimo triukšmas atsiranda dėl padangos ir kelio sąveikos. Vairuotojo įtaka TL yra naudojant garso signalą, staigiai akceleruojant, uždelsimas pajudėti.

Judančių TP skleidžiamas TL yra labiausiai veikiamas padangos ir kelio dangos sąveikos (1.5 pav.). Zofka *et al.* (2017) ir Haider *et al.* (2007) išskyrė padangų ir kelio dangos sąveikos triukšmo dedamąsias, kurios atsiranda dėl vibracijos, aerodinaminio triukšmo ir stiprinimo (1.6 pav.).

Padangos ir kelio dangos sąveikos metu triukšmą sukuriantys mechanizmai (1.5 ir 1.6 pav.) aprašyti Rasmussen *et al.* (2007). Mechaninės vibracijos (1.7 a. pav.) susidaro dėl smūgio tarp padangos protektoriaus ir kelio dangos paviršiaus. Taip pat įtaką daro padangos deformacija aplink kontaktinę sritį. Apibendrinant galima pasakyti, kad šios mechaninės vibracijos yra glaudžiai susijusios su padangų protektoriaus rašto ypatybėmis ir dangos tekstūra.

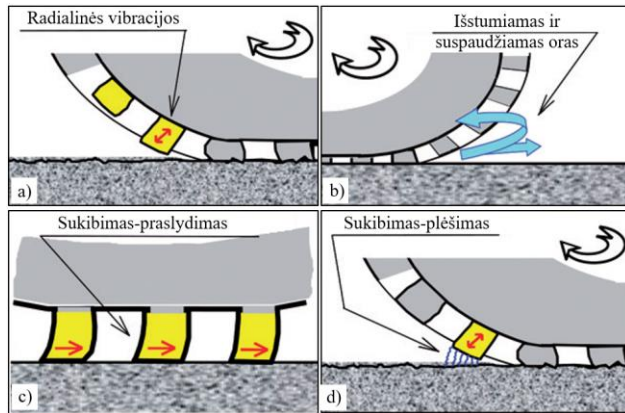




**1.6 pav.** Padangų ir kelio dangos sąveikos triukšmas, atsirandantis dėl vibracijos, aerodinaminio triukšmo ir stiprinimo (Haider *et al.* 2007)

**Fig. 1.6.** Tyre/road noise as a result of vibrations, aeroacoustic noise, and amplifications (Haider *et al.* 2007)

Oro vibracijos (1.7 b. pav.) susidaro tarp kelio paviršiaus ir padangos griovelėlių. Padangai riedant keliu, oras išspaudžiamas pro plyšius, o dalis įstringa tarp padangos ir kelio dangos, kuris yra suspaudžiamas. Vėliau, kai padangos dalis praranda kontaktą su kelio danga, įstrigęs oras yra pašalinamas, o kai kuriais atvejais oras įsiurbiamas atgal. Tai vyksta šimtus ar tūkstančius kartų per sekundę, sukuriant švilpimo garsą. Sukibimo-praslydimo efektą (1.7 c. pav.) sukuria padangą veikiančios tangentinės jėgos. Padangai nuolat deformuojantis, sukimbant su kelio danga ir praslystant pasiekus kritinę ribą, sukeliamos vibracijos. Šie procesai kiekviename protektoriaus bloke įvyksta daugybę kartų per sekundę, taip sukuriant aukšto dažnio garsą. Sukibimo-plėšimo efektas (1.7 d. pav.) sukeliamas, kai padangos protektorius staiga atsiplėšia nuo kelio dangos paviršiaus padangos ir kelio dangos kontakto srityje, sukeldamas radialinę vibraciją. Tai vyksta dėl sukibimo ir susidariusio vakuumo tarp padangos ir kelio paviršiaus, sukurdamas garsą.

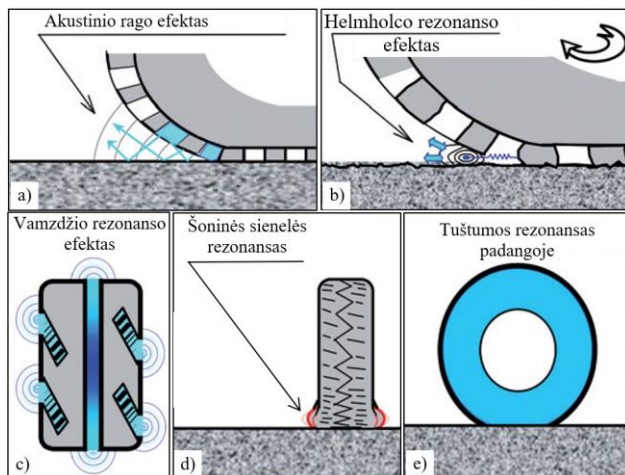


**1.7 pav.** Padangos ir kelio dangos sąveikos metu triukšmą sukuriantys mechanizmai (Rasmussen *et al.* 2007)

**Fig. 1.7.** Noise-generating mechanisms during tyre/road contact (Rasmussen *et al.* 2007)

Anksčiau aprašyti mechanizmai yra hipotetiniai padangų dangos triukšmo šaltiniai. Tačiau yra keletas stiprinimo mechanizmų, kurie gali padidinti triukšmo lygį (Rasmussen *et al.* 2007).

Akustinį rago efektą (1.8 a. pav.) sukuria padangos ir kelio dangos geometrija, kuri sudaro pleišto formos segmentą. Ši forma sukuria daugybę garso atspindžių, stiprindama garso signalą.

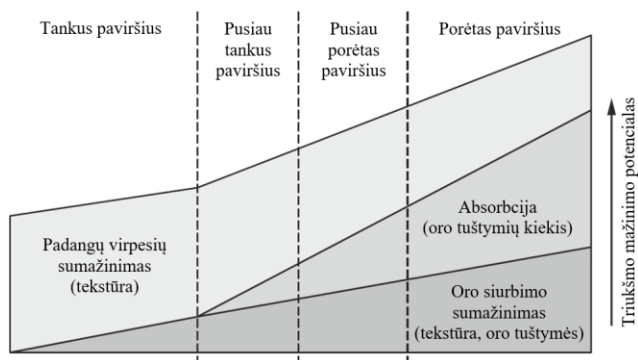


**1.8 pav.** Padangos ir kelio dangos sąveikos metu triukšmą stiprinantys mechanizmai (Rasmussen *et al.* 2007)

**Fig. 1.8.** Noise amplification mechanisms during tyre/road contact (Rasmussen *et al.* 2007)

Helmholco rezonanso efektas (1.8 b. pav.) gali būti jaučiamas šalia pleišto, kur susitinka padanga ir kelio danga. Šiuo atveju masė (oras pleišto plačiojoje pusėje) ir spyruoklė (oras uždaroje zonoje tarp kelio dangos ir padangos protektoriaus) yra viena šalia kitos. Helmholco rezonansas įvyksta, kai oro srautas juda pro oro masę pleište, ją virpinant ant oro pagalvės, veikiančios kaip spyruoklė. Vamzdžio rezonanso efektas (1.8 c. pav.) priklauso nuo vamzdžio ilgio ir kiek vamzdyje yra angų. Padangose galima rasti panašių geometrijos formų į vamzdį, nes įvairūs padangos grioveliai yra atsukti ir atidaryti įvairiuose taškuose po kontaktine padangos ir kelio dangos zona. Šoninės sienelės rezonansas (1.8 d. pav.) atsiranda dėl padangos šoninio paviršiaus deformacijos. Daugybė mažų virpesių sustiprinami kaip padangos šoninės dalies virpesiai. Tuštumos rezonansas (1.8 e. pav.) yra žinomas kaip „baliono“ efektas, kuris sukuriamas suspaudus padangą, tada galima išgirsti savitą skambėjimo garsą. Priešingai nei kiti paminėti garso stiprinimo mechanizmai, šis geriau girdimas transporto priemonės viduje, o ne už jos ribų. Oras transporto priemonės viduje linkęs dar labiau sustiprinti šį dažnį.

Vaitkus *et al.* (2019) teigia, kad kelio dangos savybės reikšmingos optimizuojant padangų ir kelio sąveikos skleidžiamo triukšmo susidarymą. Kelio dangos charakteristikoms optimizuoti, siekiant sumažinti triukšmą, labiausiai tikėtini metodai yra tekstūros optimizavimas (siekiant sumažinti triukšmą žemų dažnių diapazone) ir poringumo padidinimas (siekiant sumažinti triukšmą aukšto dažnio diapazone). Atsižvelgiant į suderintą poringumą ir tekstūrą, siekiant sumažinti triukšmą, kelio dangą galima suskirstyti į tankią dangą (4–9 % oro tuštymių), pusiau tankią (10–14 % oro tuštymių), pusiau porėtą (15–19 % oro tuštymių) ir porėtą (>19 % oro tuštymių), kaip parodyta 1.9 paveiksle (Beckenbauer 2011, Vaitkus *et al.* 2019).



**1.9 pav.** Triukšmo mažinimo potencialas pagal kelio dangos tekstūros tipą (Beckenbauer 2011, Vaitkus *et al.* 2019)

**Fig. 1.9.** Noise reduction potential depending on the type of road surface texture (Beckenbauer 2011, Vaitkus *et al.* 2019)

TL tyrimo metodų patikimumas priklauso nuo įvertintų bei neįvertintų galimų veiksnių. Svarbiausi veiksniai, turintys įtakos TS triukšmo prognozavimui, pateikti 1.1 lentelėje.

**1.1 lentelė.** Svarbiausi veiksniai, turintys įtakos transporto srauto skleidžiamo triukšmo lygio prognozavimui (Garg *et al.* 2014)

**Table 1.1.** The most important factors that influence the prediction of traffic flow noise level (Garg *et al.* 2014)

Triukšmo šaltiniai	TP greitis
	TP koncentracija
	Padangos, riedančios kelio danga, skleidžiamas triukšmas
	Variklio skleidžiamas triukšmas
	TP pasiskirstymas gatvėje
	TP judėjimo kryptis
	TP judėjimo pagreitis
	Ijungta pavara
Triukšmo sklidimas	Atmosferinis slopinimas
	Žemės efektas
	Difrakcija
	Atspindžiai
	Meteorologinės sąlygos
	Prie kelio esantys objektai
Kelio charakteristikos	Kelio dangos tipas
	Kelio dangos senėjimas
	Kelio nuolydis
	Kelio dangos būklė
	Padangų tipas
	TP ašių apkrova
	Kelio dangos temperatūra
	Eismo juostų skaičius
Kiti veiksniai	Garso signalo naudojimas
	Kelio infrastruktūros statiniai
	Sankryžos

Didėjant TP greičiui ir TP koncentracijai, didėja TL intensyvumas. Priklausomai, kokia kelio danga juda TP, girdimas skirtingas triukšmo intensyvumas, esant tam pačiam TP greičiui. Variklio skleidžiamas TL priklauso nuo jo galios ir įjungtos pavaros, kuri lemia variklio sūkius. Esant didesniems variklio sūkiams girdimas didesnis triukšmo lygis. Įprastai TP pasiskirstymas gatvėje yra netolygus. Kai TP būna nutolusios skirtingais atstumais viena nuo kitos, tai TL svyruoja ir jis ypač juntamas. TL svyravimams taip pat didelės įtakos turi TP greitėjimo ir

lėtėjimo pagreičiai. Artėjanti TP skleidžia intensyvesnį TL, nei tolstanti, todėl TP judėjimo kryptis taip pat yra svarbus TL prognozavimo veiksnys.

Garso sklidimui turintys įtaką veiksniai turi didelę reikšmę garso slopinimui, atspindėjimui ir nukreipimui. Žemės efektas yra siejamas su paviršiumi, per kurį sklinda garsas. Tipiški dirvožemio paviršiai su augalija arba be jos yra linkę absorbuoti energiją iš sklindančių akustinių bangų (su galimomis išimtimis atviroje vietoje esantis vanduo, ledas ar betonas). Atmosferinis TL slopinimas vyksta dėl garso bangų išsklaidymo ir absorbcijos dėl trinties tarp oro molekulių. Taip pat dėl meteorologinių sąlygų, t. y. lietaus ar sniego vyksta TL slopinimas. TL gali būti blokuojamas šalia kelio esančių objektų, bet nevistiškai sustabdomas dėl difrakcijos efekto. Dėl šio efekto garso bangos gali užlinkti už objektų. Taip pat nuo įvairių paviršių garso bangos gali atsispindėti ir skliti toliau pakeitusios kryptį.

Kelio charakteristikos, tokios kaip kelio dangos tipas, jos būklė, senėjimas, temperatūra, eismo juostų skaičius, nuolydis, TP ašių apkrova ir padangų tipas, yra svarbūs veiksniai triukšmo lygiui. Kelio dangos (asfalto, betono) ir padangos (vasarinės, žieminės, dygliuotos) tipas turi skirtingų akustinių savybių. Dėl kelio dangos senėjimo ir užterštumo kelio danga tampa triukšmingesnė, ja važiuojant TP. Dėl kelio nuolydžio garso bangos gali būti nukreiptos tam tikra kryptimi, taip pat lietaus vanduo pasišalina skirtingai esant skirtingam nuolydžiui. Tai lemia kelio dangos būklę, kuri gali būti sausa, šlapia ar padengta sniegu. Eismo juostų skaičius padidina laidumą, taip padidinamas ir transporto priemonių skaičius bei jų greitis gatvėse, taip turint įtaką TL.

Kiti svarbūs TS skleidžiamo TL prognozavimo veiksniai yra TP garso signalo naudojimas, kelio infrastruktūros statiniai, tokie kaip viadukai, tiltai, tuneliai, kurie gali trukdyti skliti triukšmui arba jį kitaip nukreipti. Sankryžos yra triukšmo šaltiniai dėl to, kad jose kaupiasi TP, jų greitis čia būna nepastovus.

Daroma prielaida, kad atskiroms TP išmatuotos TL statistinės vertės, kurios atsiranda dėl padangos ir kelio dangos sąveikos, yra trijų skirtingų šaltinių (1.22): padangų vibracijos dėl jų struktūros sužadinimo  $p_{vibr}^2$ , su oro srautu susiję mechanizmai dėl aerodinaminių procesų kontakto zonoje  $p_{oro}^2$ , oro srauto TL dėl srauto aplink TP kėbulą  $p_{liekamas}^2$  (Forssén *et al.* 2018). Tada triukšmo lygis apskaičiuojamas taip:

$$LA_p = 10 \log_{10} \left( \frac{p_{vibr}^2 + p_{oro}^2 + p_{liekamas}^2}{p_{ref}^2} \right), \quad (1.22)$$

čia  $p_{ref}$  – atskaitinis atmosferos slėgis,  $p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa.

Padangų vibracijos atveju (1.23):

$$P_{vibr}^2 = a_1 F_c^k, \quad (1.23)$$

čia  $a_1$  – nežinomas kiekvienos trečiosios oktavos juostos faktorius;  $k$  – nežinoma eksponentė;  $F_c$  – kontaktinės jėgos.

Oktavos juosta yra dažnių juosta, apimanti vieną oktavą. Triukšmo šaltinį galima analizuoti pagal dažnį. Visas dažnių diapazonas yra padalytas į dažnių grupes, vadinamas juostomis. Gana ryškus trečiosios oktavos juostų 800–1250 kHz dažnis (Sandberg 2003). Tai ypač reikšminga nustatant TP padangų ir kelio sąveikos skleidžiamą triukšmo lygį, kai žiūrima į spektrus. Šiame dažnio diapazone įprastai nustatomos didžiausios TL vertės.

Su oro srautu susiję mechanizmai dėl aerodinaminių procesų kontakto zonoje (1.24):

$$P_{oro}^2 = a_2 F_c^m s^{-m} R_s^n v^o, \quad (1.24)$$

čia  $a_2$  – nežinomas kiekvienos trečiosios oktavos juostos faktorius;  $m, n, o$  – nežinomos eksponentės;  $s$  – padangos standumas;  $R_s$  – kelio paviršiaus atsparumas;  $v$  – greitis.

Oro srauto aplink TP kėbulą TL (1.25):

$$P_{liekamasis}^2 = a_3 F_c^m, \quad (1.25)$$

čia koeficientas  $a_3$  nustatomas kiekvienai trečiajai oktavai atliekant matavimus vėjo tunelyje.

TS skleidžiamam triukšmui naudojami modeliai.

Federalinio greitkelio administravimo TS triukšmo modelis (angl. *FHWA model – The Federal Highway Administration Traffic Noise model*) (1.26) matematiškai aprašomas Dai *et al.* (2014) ir Zhao *et al.* (2015):

$$LA_{eq(h),i} = LA_{0N,i} + 10 \lg \left( \frac{N_i \pi D_0}{V_i T} \right) + 10 \lg \left( \frac{D_0}{D} \right)^{1+\alpha} + 10 \lg \left( \frac{\psi_a(\varphi_1, \varphi_2)}{\pi} \right) + \Delta S, \quad (1.26)$$

čia  $LA_{eq(h),i}$  – valandinis ekvivalentinis nuolatinio garso slėgio lygis TP klasei, dB(A);  $LA_{0N,i}$  – vidutinis TL, nutolus žinomam atstumu nuo triukšmo šaltinio, dB(A);  $N_i$  – TP, kurių klasė atitinka atitinkamą valandą, skaičius;  $v_i$  – vidutinis TP atitinkamos klasės greitis, m/h;  $T$  – tiriamos laiko atkarpos trukmė, val.;  $D$  – statmenas atstumas nuo eismo juostos centro linijos iki mikrofono, m;  $D_0$  – žinomas atstumas nuo triukšmo šaltinio, m.  $D_0 = 15$  m.  $\alpha$  – parametras, kuris priklauso nuo dangos savybių,  $0 < \alpha < 1$ , kai paviršius yra gerai atspindintis triukšmą  $\alpha = 0$ , kai paviršius, absorbuojantis triukšmą,  $\alpha = 0,5$ ;  $\psi_a$  – pakoreguota kelio

galinio ilgio funkcija, rad;  $\varphi_1, \varphi_2$  – stebėtojo kampai nuo įprastos linijos nuo stebėtojo iki šaltinio ir linijų iki ribinio kelio ruožo galo, rad;  $\Delta S$  – kelio struktūros arba triukšmo barjero sukeltas slopinimas, dB(A).

Kelių TS TL apskaičiavimo modelis (angl. *CoRTN model – Calculation of Road Traffic Noise model*) aprašomas triukšmo šaltinio emisijos išraiška (1.27), kuri suteikia valandinį A svertinį garso slėgio lygį 10 % srauto laikui, kuris yra 13,5 m atstumu nuo šaltinio (1.27) (Peng *et al.* 2019). Modelis padalija TP į dvi kategorijas: lengvasias ir sunkiasias TP (Can *et al.* 2018):

$$LA_{10(1h)} = 10 \log_{10} q + 33 \log_{10} \left( v + 40 + \frac{500}{v} \right) + 10 \log_{10} \left( 1 + \frac{500 r_{HV}}{v} \right) - 26,6, \quad (1.27)$$

čia  $q$  – TS eismo intensyvumas, aut./h;  $v$  – vidutinis greitis, km/h;  $r_{HV} = 0$  lengvosios,  $r_{HV} = 1$  sunkiasvorėms TP. Iš  $LA_{10(1h)}$  atėmus 3 dB(A) gaunamas svertinis ekvivalentinis nuolatinis garso slėgio lygis  $LA_{10(1h)}$ .

Rekomendacijų dėl triukšmo keliuose modelis (vok. *RLS 90 model – Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen*) nustato triukšmo lygį 25 m atstumu nuo kelio ir 4 m virš žemės.  $LA_{me}$  nustatomas atsižvelgiant į TS eismo charakteristikas (1.28), pvz., TP greitį, jų pasiskirstymą pagal svorį, kelio paviršių su atitinkamu nuolydžiu ir triukšmo energijos pridėjimą dėl pastatų, esančių šalia kelio atspindžio (Gomez *et al.* 2015):

$$LA_{me} = 37,5 + 10 \log_{10} (q(1 + 0,082P)) + C_s + C_{rs} + C_g + C_r, \quad (1.28)$$

čia  $q$  – TS eismo intensyvumas, aut./h;  $P$  – sunkvežimių, viršijančių 2,8 t, procentinė dalis;  $C_s, C_{rs}, C_g, C_r$  – TP greičio, kelio paviršiaus, nuolydžio ir daugialypio atspindžio pataisos koeficientai.

Japonijos akustinės draugijos kelių eismo triukšmo prognozavimo (angl. *ASJ RTN Model 2013 – The Acoustical Society of Japan Road traffic noise prediction model*) modelyje TL apskaičiuojamas pagal funkciją, kuri priklauso nuo TP greičio (1.29) (Okada *et al.* 2014, Sakamoto 2015):

$$LA_W = a + b \lg(v) + \Delta LA_{surf} + \Delta LA_{grad} + \Delta LA_{dir} + \Delta LA_{etc}, \quad (1.29)$$

čia  $v$  – vidutinis greitis, km/h;  $a$  ir  $b$  yra regresijos koeficientai;  $\Delta LA_{surf}, \Delta LA_{grad}, \Delta LA_{dir}, \Delta LA_{etc}$  – kelio dangos, kelio nuolydžio, garso sklaidimo krypties ir kitų veiksnių pataisos koeficientai.

Harmoningu aplinkos triukšmo prognozavimo (angl. *Harmonoise model*) modeliu transporto priemonės padalijamos į penkias kategorijas: lengvasias transporto priemones (automobilius, furgonus ir sunkvežimius), vidutinio sunkumo

transporto priemonės, sunkiasvorių transporto priemonės, kitos sunkiasvorių transporto priemonės ir dviratinės transporto priemonės. Modelis grindžiamas statistiniais duomenimis, kurių atskaitos atstumas yra 7,5 m (Garg *et al.* 2014, Can *et al.* 2018). Triukšmo lygis padalijamas pagal šias (1.30 ir 1.31) išraiškas:

$$LA_{WR}(f) = a_R(f) + b_R(f) \log \left( \frac{v}{v_{ref}} \right); \quad (1.30)$$

$$L_{PR}(f) = a_P(f) + b_P(f) \log \left( \frac{v}{v_{ref}} \right), \quad (1.31)$$

čia koeficientai  $a_R$ ,  $b_R$ ,  $a_P$  ir  $b_P$  yra pateikiami 1/3-os oktavos dažnių diapazone nuo 25 Hz iki 10 kHz;  $v_{ref}$  – atskaitinis greitis, 70 km/h.

Taikant kelio triukšmo skaičiavimo modelį (angl. *Son Road model*), atsižvelgiama į dviejų tipų TP (1.32 ir 1.33) – lengvasias ir sunkiasvorių TP. TL aprašymas pagrįstas A svoriu maksimaliu vienos transporto priemonės triukšmo lygiu 7,5 m atstumu nuo šaltinio ir 1,2 m aukštyje virš žemės (Garg *et al.* 2014).

$$LA_{W, lengvosios} = 28,5 + 10 \log \left( 10^{0,1(7,3+35 \log(v))} + 10^{0,1 \left( 60,5 + 10 \log \left( 1 + \left( \frac{v}{44} \right)^{3,5} + \Delta_s \right) \right)} + \Delta_{GB} \right); \quad (1.32)$$

$$LA_{W, sunkiasvorių} = 28,5 + 10 \log \left( 10^{0,1(16,3+35 \log(v))} + 10^{0,1 \left( 74,7 + 10 \log \left( 1 + \left( \frac{v}{56} \right)^{3,5} + \Delta_s \right) \right)} + \Delta_{GB} \right), \quad (1.33)$$

čia  $v$  – transporto priemonės greitis, km/h;  $\Delta_{GB}$  – pataisa dėl kelio paviršiaus;  $\Delta_s$  – pataisa dėl įkalnės, %.  $\Delta_s = 0,8 \cdot g$ .

Šiaurės šalių aplinkos triukšmo prognozavimo metodas (angl. *Nord 2000 model – Nordic Environmental Noise Prediction Methods*) suteikia galimybę apskaičiuoti garso slėgio lygį stebimos gatvės mazge (1.34) nuo šaltinio  $LA_w$  garso galios lygio, pakoreguoto pagal geometrinį skirtumą, žemės efektą  $K(Z)$ , sklaidos efektą  $Ae(r)$  ir atmosferos absorbciją  $A_A$  (Tarrero *et al.* 2008):

$$LA(r) = LA_w - 10 \log(4\pi r^2) + K(Z) + Ae(r) + A_A, \quad (1.34)$$

čia  $LA_w$  – TL nagrinėjamoje dažnių juostoje.



Prancūzų kelių eismo triukšmo prognozavimo metodas (*NMPB-Routes-2008 model*) apibūdina triukšmo lygio slopinimą dėl aplinkos sąlygų (1.35) (Dutilleux *et al.* 2010):

$$LA_{A,C} = LA_w - (A_{div} + A_{atm} + A_{bnd,C}), \quad (1.35)$$

čia  $LA_w$  – šaltinio triukšmo lygis,  $A_{div}$  – geometrinis plitimas,  $A_{atm}$  – atmosferos sugertis,  $A_{bnd,C}$  – slopinimas, susijęs su garso greičio profiliu ir ribine charakteristika.  $A_{atm}$  apskaičiuojamas pagal ISO 9613-1 (1993) standartą, esant 15 °C temperatūrai ir 70 % santykinę drėgmę.

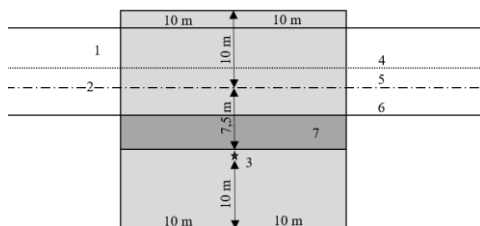
Plačiai taikomi transporto priemonių skleidžiamo triukšmo tyrimo metodai leidžia nustatyti tik vidutinį transporto priemonių skleidžiamą triukšmą pasirinktame laiko intervale. Dažniausiai nustatomas valandos vidutinis triukšmo lygis.

Remiantis vidutinėmis triukšmo lygio reikšmėmis, sudaromi ir miestų triukšmo lygio žemėlapių (Kliučininkas, Šaliūnas 2006).

### 1.3. Standartai ir reglamentai transporto priemonių triukšmo lygiui tirti

TP skleidžiamam TL tirti naudojami standartai yra: ISO 11819-1 (2002) kelių važiuojančios transporto priemonės skleidžiamo triukšmo matavimo statistinis metodas ir ISO 11819-2 (2017) didelio artumo metodas kelio dangos paviršiaus poveikio eismo triukšmui.

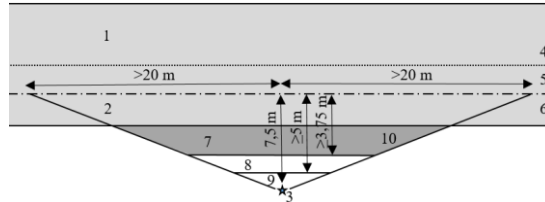
Kelio dangos paviršiaus poveikio TL matavimo standartas ISO 11819-1 (2002) skirtas tirti kelių važiuojančios transporto priemonės skleidžiamą triukšmą matavimo statistiniu metodu (angl. *Statistical Pass-By (SPB)*), taip pat leidžia nustatyti TL priklausomybę nuo atskirų TP greičio bei jų kategorijos. Šis metodas tinkamas tirti bendrą atskirų TP skleidžiamą triukšmo lygį.



**1.10 pav.** Minimalūs atstumai nuo mikrofono pozicijos iki atspindinčių ar slopinančių triukšmą objektų, ISO 11819-1 (2002)

**Fig. 1.10.** Minimum distances from microphone position to reflecting or attenuating objects, ISO 11819-1 (2002)

Standartas ISO 11819-1 (2002) nurodo, kad mikrofonas 3 (1.10 pav.) turi būti  $7,5 \pm 0,1$  m nutolęs nuo testuojamos eismo juostos vidurio 5 ir pakeltas į 1,2 m aukštį. Nuo mikrofono ir testuojamos eismo juostos mažiausiai 10 m atstumu neturi būti jokių objektų, galinčių atspindėti ar slopinti TL. Gretimoje eismo juostoje 1 ir testuojamoje eismo juostoje neturi būti kitų TP.

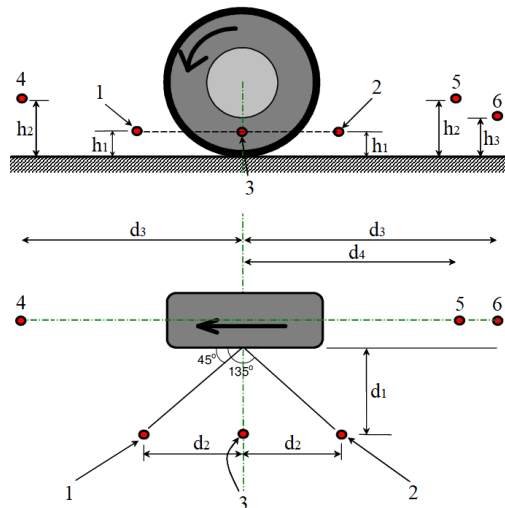


**1.11 pav.** Minimali tinkamo paviršiaus aprėptis tarp bandymo juostos ir mikrofono, ISO 11819-1 (2002)

**Fig. 1.11.** Minimum appropriate surface coverage between test line and microphone, ISO 11819-1 (2002)

Nuo testuojamos eismo juostos vidurio linijos 5, ne mažiau kaip 3,75 m atstumu 10 (1.11 pav.), paviršiaus triukšmo slopinimo savybės turi būti panašios į testuojamos kelio dangos savybes. Ne mažiau kaip 5 m atstumu 8 neturi būti aukštos žolės, o tarp 5 m ir 7,5 m zonoje 9 nėra jokių reikalavimų.

Didelio artumo metodas (CPX) taikomas tada, kai norima kuo tiksliau nustatyti kelio paviršiaus ir padangos sąveikos skleidžiamą triukšmo lygį.



**1.12 pav.** Mikrofonų padėtis tyrimams didelio artumo metodu, ISO 11819-2 (2017)

**Fig. 1.12.** Microphone positions for the CPX measurements, ISO 11819-2 (2017)

Mikrofonai išdėstomi standartizuotose padėtyse (1.12 pav.) šalia tiriamo rato. Standartas ISO 11819-2 (2017) nurodo, kad turi būti naudojama nuo 4 iki 6 mikrofonų. Mikrofonai gali būti montuojami ant savaeigės TP arba ant tyrimui pritaikytos priekabos.

Mikrofonų įrengimo padėtis tyrimams didelio artumo metodu priklauso nuo mikrofonų skaičiaus. Jų padėtys nurodytos 1.2 lentelėje.

**1.2 lentelė.** Mikrofonų padėtis tyrimams didelio artumo metodu, ISO 11819-2 (2017)

**Table 1.2.** Microphone positions for the CPX measurements, ISO 11819-2 (2017)

Mikrofonai	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$
1, 2	0,10 m			0,20 m	0,20 m		
3	0,10 m			0,20 m	0,00 m		
4, 5		0,20 m				0,65 m	
6			0,15 m				0,80 m

1.2 lentelėje nurodytas įrengimo aukštis  $h_i$  ir atstumas  $d_i$  iki padangos. Kuo didesnis skaičius naudojamų mikrafonų, tuo tiksliau galima įvertinti skirtingomis kryptimis sklindančio triukšmo lygį.

Matavimai CPX metodu atliekami važiuojant pastoviu 50 km/h, 80 km/h arba 110 km/h greičiu, atsižvelgiant į leidžiamą važiavimo greitį kelio ruože. Triukšmo lygis įrašomas nenutrūkstamai.

## 1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Atlikus mokslo darbų, skirtų kelių transporto skleidžiamam triukšmo lygiui tirti, analizę, nustatyta:

1. Transporto srautų modeliavimą galima suskirstyti į mikro- ir makrolygmenų transporto srautų modeliavimą. Mikromodeliavimas apima visas atskiras transporto priemones ir dėl to tiksliau aprašo transporto srautą, o makromodeliavimas – atskirų TP neišskiria ir gaunamos vidutinės srauto reikšmės.
2. Atskiri TP mazgai, kaip triukšmo šaltiniai, vienas už kitą tampa triukšmingesni, esant skirtingam TP greičiui. Esant nedideliam greičiui (lengvosios TP iki 15–40 km/h, sunkiosios iki 55–80 km/h), TP variklio triukšmingumas yra didesnis už padangos ir kelio dangos sąveikos triukšmą. Didėjant TP greičiui, padangos ir kelio dangos sąveikos TL

tampa svarbesnis bendram TL, važiuojant didesniu kaip 80 km/h greičiu, bendrą TL didina aerodinaminis TL.

3. Porėtos kelio dangos tekstūros tipas pasižymi absorbcinėmis triukšmo lygio savybėmis, kuriomis nepasižymi tankų paviršių turinti kelio danga.
4. Transporto priemonių skleidžiamo triukšmo tyrimo metodai leidžia nustatyti vidutinį transporto priemonių skleidžiamą triukšmo lygį pasirinktame laiko intervale, tačiau neįmanoma nustatyti momentinio triukšmo lygio. Dažniausiai nustatomas valandos vidutinis triukšmo lygis.

Išanalizavus mokslinę literatūrą, formuluojami disertacijos uždaviniai:

1. Atlikti transporto srauto dinaminį procesų eksperimentinius tyrimus, leidžiančius patobulinti diskretinį transporto srauto tyrimo metodą.
2. Pritaikant patobulintą diskretinį transporto srauto tyrimo metodą, įvertinti šviesoforų signalų persijungimo periodo ir eismo įvykių likvidavimo trukmės įtaką transporto srauto dinaminiam procesams.
3. Atlikti transporto srauto skleidžiamo triukšmo lygio eksperimentinius tyrimus, įvertinančius kelio dangos būklę, transporto priemonių važiavimo greitį ir kategoriją ir sukurti transporto srauto skleidžiamo triukšmo lygio tyrimo metodiką.
4. Taikant sukurtą transporto srauto skleidžiamo triukšmo lygio tyrimo metodiką patobulintam diskretiniam transporto srauto tyrimo metodui, nustatyti transporto srauto skleidžiamą momentinį triukšmo lygį.

---

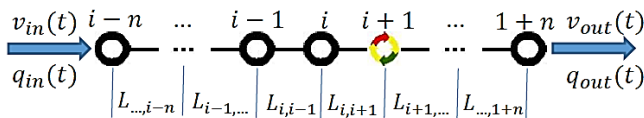
## **Patobulintas diskretinis transporto srauto tyrimo metodas ir sukurta momentinio triukšmo lygio tyrimo metodika**

Šiame skyriuje pateikiamas patobulintas DTSTM. Sukurta transporto srauto skleidžiamo momentinio triukšmo lygio tyrimo metodika (MTLTM), vertinant kintantį vidutinį TS greitį, TP koncentraciją, TS sudėtį, pagreitį, kelio dangos tipą ir jo savybes dėl kritulių.

Skyriaus tematika paskelbtos penkios autoriaus publikacijos kartu su bendraautoriais (Danilevičius, Bogdevičius 2017<sup>a</sup>; Danilevičius, Bogdevičius 2017<sup>b</sup>; Danilevičius, Bogdevičius 2018; Danilevičius *et al.* 2018; Danilevičius, Bogdevičius 2020).

## 2.1. Patobulintas diskretinis transporto srauto tyrimo metodas

Tiriant TS dinامينius procesus, sudaromas tiriamos gatvės scheminis modelis pagal 2.1 paveiksle pateiktą principinę schemą TS modeliui sudaryti. Modelyje tiriamoji gatvė suskaidoma į pasirinkto ilgio  $L_{i,i+1}$  gatvės elementus. Šių gatvės elementų susijungimo vietas įvardijamos kaip gatvės mazgai  $i$ . Mazgai numeruojami ir pagal principinę schemą pažymimi simboliu  $\bullet$ . Jeigu modeliuojamoje gatvėje yra reguliuojami šviesoforai, tada gatvės mazgas, atitinkantis vietą, kurioje yra reguliuojami šviesoforai, pažymimas simboliu  $\bullet$ .



**2.1 pav.** Transporto srauto modelio sudarymo schema: gatvės mazgas  $i$ , kuris jungia gatvės elementus  $L_{i,i-1}$  ir  $L_{i,i+1}$ ;  $\bullet$  – gatvės mazgas be šviesoforo;  $\bullet$  – gatvės mazgas su šviesoforu

**Fig. 2.1.** Scheme for the traffic flow model: street node  $i$ , which connects the street elements  $L_{i,i-1}$  and  $L_{i,i+1}$ ;  $\bullet$  – street node without traffic light;  $\bullet$  – street node with traffic light

Tiriant TS dinامينius procesus, priimtos šios prielaidos:

1. Nagrinėjamas tiesios ir vienos eismo krypties gatvės ruožas su viena eismo juosta.
2. Nagrinėjamo gatvės ruožo pradžioje yra žinomas TS vidutinis greitis ir eismo intensyvumas, o gatvės ruožo pabaigoje žinoma transporto priemonių koncentracija.
3. TS tyrimuose visų reguliuojamųjų vieno lygio sankryžų šviesoforų šviesos signalai persijungia tais pačiais laiko momentais, t. y. nevertinama žalioji banga.
4. Nagrinėjamas „perkrautas“ TS, t. y. rytinis ar popietinis TS ir neįvertinami įvažiavimai ir išvažiavimai į šalutines gatves.
5. Transporto srautas nagrinėjamas kaip vienaarūšis, t. y. visos transporto priemonės yra lengvieji automobiliai.

Tyrinėjant TS dinامينius procesus reikia, žinoti TS kintamųjų kitimą kraštinuose gatvės ruožo mazguose (kraštinės sąlygos), t. y. kaip kinta TS parametrai: koncentracija, greitis arba eismo intensyvumas įėjimo ir išėjimo gatvės mazguose (2.1 pav.). Šiuos duomenis galima gauti atlikus TS registraciją, panaudojant turimą TS matavimo įrangą arba informaciją, gautą iš eismą reguliuojančių įmonių

(pvz., Vilniaus miesto SĮ „Susisiekimo paslaugos“). Išanalizavus šią informaciją, galima nustatyti determinuotas ar atsitiktines TS parametrų funkcijas. Dažniausiai registruojami šie TS parametrai: greitis  $v(t)$  ir eismo intensyvumas  $q(t)$ . Išskleidus šiuos parametrus Furjė eilute, gaunami šių parametrų kitimo dėsniniai.

Bendru atveju TS eismo intensyvumas pirmame gatvės mazge gali kisti pagal dėsninę (2.1):

$$q_{in}(t) = q_{in_0} + \sum_{k=1}^{N_q} A_{qk} \sin(k\omega_{TS}t + \varphi_{qk,in}), \quad (2.1)$$

čia  $q_{in_0}$  – vidutinė TS eismo intensyvumo reikšmė, aut./s;  $A_{qk}$ ,  $\varphi_{qk,in}$  –  $k$ -oji TS eismo intensyvumo amplitudė ir pradinė fazė;  $\omega_{TS}$  – TS eismo intensyvumo kampinis greitis, rad/s;  $N_q$  – harmonikų skaičius.

TS eismo intensyvumo kitimo kampinis greitis  $\omega_q$  yra lygus (2.2):

$$\omega_{TS} = \frac{2\pi}{T_{TS}}, \quad (2.2)$$

čia  $T_{TS}$  – bendras TS registravimo laikas, s.

TS greitis pirmame gatvės mazge gali kisti pagal dėsninę, pateiktą (2.3) išraiška:

$$v_{in}(t) = v_{in_0} + \sum_{k=1}^{N_v} A_{vk} \sin(k\omega_{TS}t + \varphi_{vk,in}), \quad (2.3)$$

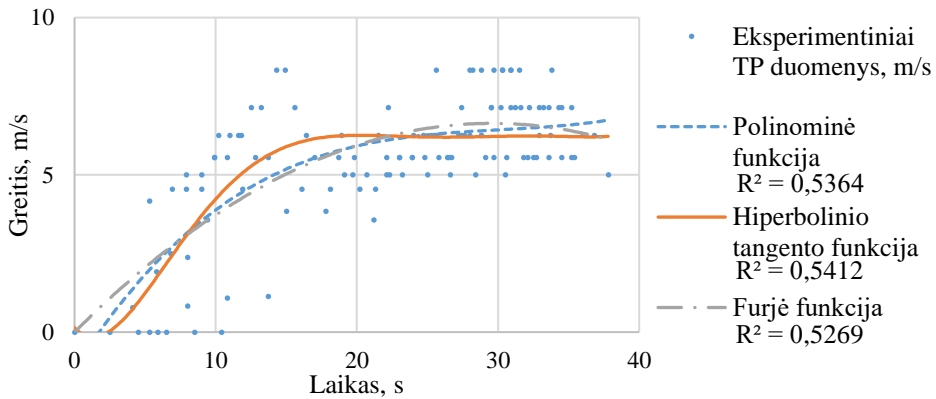
čia  $v_{in_0}$  – vidutinė TS greičio reikšmė, m/s;  $A_{vk}$ ,  $\varphi_{vk,in}$  –  $k$ -oji TS greičio amplitudė ir pradinė fazė.

Šie TS parametrai  $v_{in_0}$ ,  $q_{in_0}$  gali būti ir atsitiktiniai dydžiai, kurie gali kisti pagal tam tikrą dėsninę, kuris turi būti nustatomas atlikus TS analizę.

Sukurtame DTSTM aprašant TP koncentracijos ir greičio kitimą modeliuojamos gatvės mazge buvo naudojami pastovūs koeficientai (1.2, 1.3) lygtyse, kurie buvo priimti kaip pastovūs metodo parametrai. Tačiau tyrinėjant TS panaudojus DTSTM buvo pastebėta, kad kai TS sustoja prieš šviesoforą ir paskui užsidegus žaliai šviesoforo signalui TP pagreičių reikšmės buvo gaunamos per didelės. Be to, eismo juostose susikaupusios TP pradeda važiuoti, pirmos TP, esančios prie šviesoforo atžvilgiu, delsdama.

Siekiant nustatyti, pagal kokią tendenciją kinta TS greitis, jam pradedant važiuoti užsidegus žaliai šviesoforo signalui, buvo atlikti TS greičio kitimo eksperimentiniai tyrimai (plačiau tyrimas aprašytas 3.2 skyriuje). Remiantis TS judėjimo prieš sankryžą, reguliuojamą šviesoforais, eksperimentiniais rezultatais,

buvo siekiama nustatyti, kokią TS parametrų kitimo funkciją (2.2 pav.) būtų racionalu naudoti. Labiausiai atitinkanti TS parametrus kitimo funkcija parodo tų parametrų kitimo tendenciją. Remiantis šia funkcija, galima aprašyti  $r_{k_i, in, i, j}$  ir  $r_{k_i, out, i, j}$  koeficientų kitimo funkciją. Nubrėžus labiausiai atitinkančias regresijos kreives (trečio laipsnio polinominė, hiperbolinio tangento, Furjė) per eksperimentinių duomenų taškus, buvo nustatyta, kad didžiausia determinacijos koeficiento reikšmė  $R^2 = 0,541$  yra hiperbolinio tangento funkcijos.



**2.2 pav.** Transporto srauto greičio kitimo funkcijų palyginimas remiantis eksperimentiniais transporto priemonių greičio kitimo duomenimis užsidegus žaliajam šviesoforo signalui sankryžoje

**Fig. 2.2.** Comparison of traffic flow velocity variation functions based on experimental vehicle velocity data, when traffic light switches to green

Todėl atlikus TS eksperimentinius tyrimus, buvo nustatyta, kad racionaliausios šių parametrų kitimo funkcijos yra šios (2.4 ir 2.5):

$$r_{k_i, in, i, j} = \tanh \left( c_{k_{in}} \left( \frac{k_i(t)}{k_{i, \max}} \right)^2 \right); \quad (2.4)$$

$$r_{k_i, out, i, j} = \tanh \left( c_{k_{out}} \left( \frac{k_i(t)}{k_{i, \max}} \right)^2 \right), \quad (2.5)$$

čia  $c_{k_{in}}$ ,  $c_{k_{out}}$  – koeficientai,  $c_{k_{in}} = 0,15$ ;  $c_{k_{out}} = 0,15$ ;  $\tanh$  – hiperbolinis tangentas;  $k_{i, \max}$  – maksimaliai galima koncentracija, aut./m;  $k_i(t)$  – TP koncentracija laiko momentu  $t$ , aut./m.



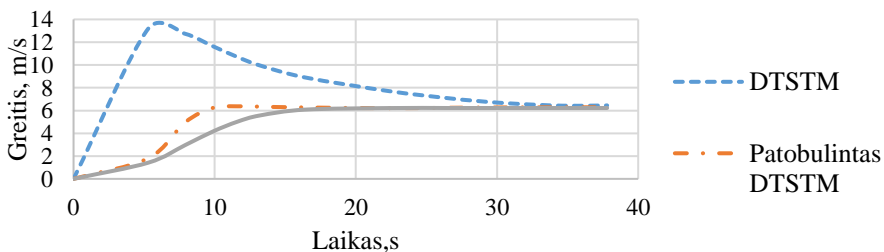
Šiose funkcijose  $r_{k_i,in,i,j}$  ir  $r_{k_i,out,i,j}$  koeficientams rasti naudojamas hiperbolinis tangentas, kurio funkcijos kreivė nustatoma eksperimentiniais duomenimis, tiksliausiai atkartoja TS greičio kitimo tendenciją. Koeficientai  $c_{k_{in}}$  ir  $c_{k_{out}}$  skirti TS pagreičių kitimo jautrumui mažinti. Jų parinkimas lemia TS judėjimo atitiktį eksperimentiniams rezultatams. Kadangi TS judėjimas priklauso nuo esamos TP koncentracijos  $k_i(t)$  ir maksimaliai galimos jų koncentracijos  $k_{i,max}$  gatvėje, tai  $r_{k_i,in,i,j}$  ir  $r_{k_i,out,i,j}$  kinta priklausomai nuo esamų sąlygų gatvėje.

Patobulinus DTSTM kintančiais  $r_{k_i,in,i,j}$  ir  $r_{k_i,out,i,j}$  koeficientais, gautos TS, esančio prie šviesoforo, užsidegus žaliajam signalui, greičio kitimo kreivės. Skirtumas tarp dviejų kreivių apskaičiuojamas pagal (2.6) lygtį. Prieš patobulinimą matoma akivaizdi neatitiktis eksperimentiniams rezultatams (2.3 pav.). Užsidegus žaliajam šviesoforo signalui, pirmosiomis 20 s skirtumas tarp šių kreivių yra 263,4 %. Po 20 s iki 40 s skirtumas sumažėja iki 8,62 %.

$$\Delta x = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{a_i - b_i}{b_i} \right) \cdot 100 \% , \quad (2.6)$$

čia  $a_i$  – pirmosios kreivės  $i$ -toji reikšmė;  $b_i$  – antrosios kreivės  $i$ -toji reikšmė;  $n$  – reikšmių skaičius.

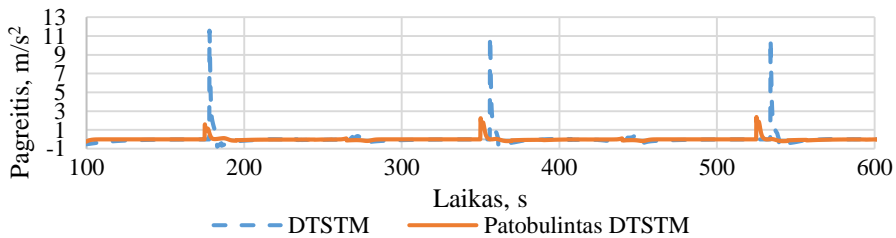
O TS greičio kitimo rezultatai padujant, gauti modeliavimo metu, naudojant patobulintą DTSTM, yra daug tikslesni. Užsidegus žaliajam šviesoforo signalui, pirmosiomis 20 s skirtumas tarp šių kreivių yra 31,4 %. Po 20 s iki 40 s skirtumas sumažėja iki 0,706 %. Šis skirtumas gali kisti priklausomai nuo esamos koncentracijos modeliuojamoje gatvėje. Palyginus DTSTM ir patobulintą DTSTM gauti 231 % artimesni eksperimentiniams TS greičio kitimo rezultatai pirmosiomis 20 s užsidegus žaliajam šviesoforo signalui. Po 20 s iki 40 s skirtumas sumažėja iki 7,91 %. Taip pat perpus sutrumpėjo TS pereinamasis procesas iki nusistovėjusio greičio.



**2.3 pav.** Transporto srauto greičio pokyčio, užsidegus žaliajam šviesoforo signalui, eksperimentinių ir teorinių tyrimų rezultatų palyginimas

**Fig. 2.3.** Comparison of experimental and theoretical results of traffic flow changes, when traffic light switches to green

Patobulinius DTSTM, pagreičio reikšmės tapo mažesnės, artimos galimoms realaus TS reikšmėms. Pagal Bokare, Maurya (2017) TP greitėjimo reikšmės vidutiniškai būna iki  $2,87 \text{ m/s}^2$ , o lėtėjimo –  $4,53 \text{ m/s}^2$ . TS pagreičių palyginimas gautas naudojant DTSTM ir patobulintą DTSTM (2.4 pav.). Naudojant DTSTM, pagreičių reikšmės pradedant TS judėti iki patobulinimo stipriai viršijo išvystomas TP pagreičių reikšmes, kurios pasiekdavo  $12 \text{ m/s}^2$ . Patobulinius DTSTM, sumažėjo iki  $2,5 \text{ m/s}^2$ . Tai turi teigiamą įtaką TS dinaminiam procesams, nes pagreičių pikai naudojant patobulintą DTSTM sumažėjo iki Bokare, Maurya (2017) tyrimuose nustatytų reikšmių.



**2.4 pav.** Diskretinio transporto srauto tyrimo metodo ir patobulinto diskretinio transporto srauto tyrimo metodo pagreičių palyginimas

**Fig. 2.4.** Comparison of discrete traffic flow method and modified discrete traffic flow method accelerations

Be to, (2.4 ir 2.5) formulėse naudojami  $c_{k_{in}}$ ,  $c_{k_{out}}$  koeficientai yra nustatyti, kai atstumas tarp gatvės mazgų yra  $\Delta x = 50 \text{ m}$ . Tačiau esant skirtingiems atstumams  $\Delta x$ , koeficientai  $c$  gali kisti. Norint tiksliau nustatyti šiuos koeficientus, reikalingi papildomi eksperimentiniai tyrimai.

Modeliuojamos gatvės paskutiniame mazge greitis  $v_{out}(t)$  priklauso nuo tuo metu esančios koncentracijos  $k(t)$ :

$$v_{out}(t) = \left( 1 - \left( \frac{k(t)}{k_{max}} \right)^{a_2} \right)^{a_1}, \quad (2.7)$$

čia  $k(t)$  – esama TP koncentracija, aut./m;  $k_{max}$  – maksimaliai galima TP koncentracija, aut./m.

Funkcija  $k(t)$  gaunama pagal fundamentaliąją transporto srautų funkciją:

$$k(t) = \frac{q_{out}(t)}{v_{out}(t)}. \quad (2.8)$$

Tada į (2.7) įrašius (2.8) funkciją gaunama netiesinė funkcija (2.9):

$$\Phi = v_{out}(t) - \left( 1 - \left( \frac{q_{out}(t)}{v_{out}(t)k_{max}} \right)^{a_2} \right)^{a_1} = 0. \quad (2.9)$$

Sprendžiant Niutoni–Rapsono metodu gaunamas  $k$ -osios iteracijos patikslintas TS greičio skirtumas (2.10):

$$\Delta v_{out,k}(t) = - \frac{\Phi v_{out,k}(t)}{\frac{d\Phi}{dv_{out}(t)} v_{out,k}(t)}. \quad (2.10)$$

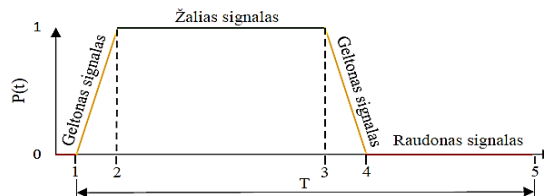
Patikslintas kitos iteracijos greitis (2.11):

$$v_{out,k+1}(t) = v_{out,k}(t) + \Delta v_{out,k}(t). \quad (2.11)$$

Tada gaunamas patikslintas greitis  $\Delta v_{out,k}(t)$  skaičiuojamas iki parinkto tikslumo  $v_{tiksl.}$  (2.12):

$$|\Delta v_{out,k}(t)| \leq v_{tiksl.} \quad (2.12)$$

Norint gauti optimalias sąlygas gatvėje, kurioje TS valdomas šviesoforais, galima remtis Websterio modeliu atskiroms šviesoforo signalų trukmėms apskaičiuoti, kurios sudaro visą šviesoforo signalų ciklą  $T$  (2.5 pav.).



**2.5 pav.** Šviesoforo signalų perjungimo ciklo schema  
**Fig. 2.5.** Scheme for traffic light switching

Geltono šviesos signalo trukmė gali būti nustatoma pagal Almeida *et al.* (2017) naudojamą (2.13) išraišką:

$$T_a = \tau_r + \frac{v_{max}}{2a_{vid}}, \quad (2.13)$$

čia  $\tau_r$  – vidutinis vairuotojo reakcijos laikas, s;  $v_{max}$  – leidžiamasis greitis gatvėje, m/s;  $a_{vid}$  – vidutinis lėtėjimo pagreitis  $m/s^2$ .

Racionalus šviesoforo signalų perjungimo periodas nustatomas pagal Calle-Laguna *et al.* (2019) naudojamą (2.14) išraišką, pagal kurią galima apskaičiuoti šviesoforo signalų perjungimo periodą nuo 30 iki 180 s:

$$T_{opt} = \min \left( \max \left( 30, \alpha \ln \left( \frac{T_{pr}}{1-q} \right) + \beta \right), 180 \right), \quad (2.14)$$

čia  $T_{pr}$  – prarastas laikas šviesoforo ciklo metu, kai TP priverstos stovėti vietoje, s;  $q$  – TS eismo intensyvumas, aut./s;  $\alpha$  ir  $\beta$  – Websterio modelio koeficientai.

Calle-Laguna *et al.* (2019) nustatė, kad siekiant sutrumpinti kelionės trukmę (2.15), sumažinti degalų sąnaudas (2.16) arba sumažinti CO<sub>2</sub> emisiją (2.17), šviesoforų periodai skiriasi. Atskiriems atvejams autoriai nustatė  $\alpha$  ir  $\beta$  koeficientų reikšmes:

$$T_{opt, kel.laik.} = 39,3 \ln \left( \frac{T_{pr}}{1-q} \right) - 75,5; \quad (2.15)$$

$$T_{opt, deg.sq.} = 26,12 \ln \left( \frac{T_{pr}}{1-q} \right) - 3,5; \quad (2.16)$$

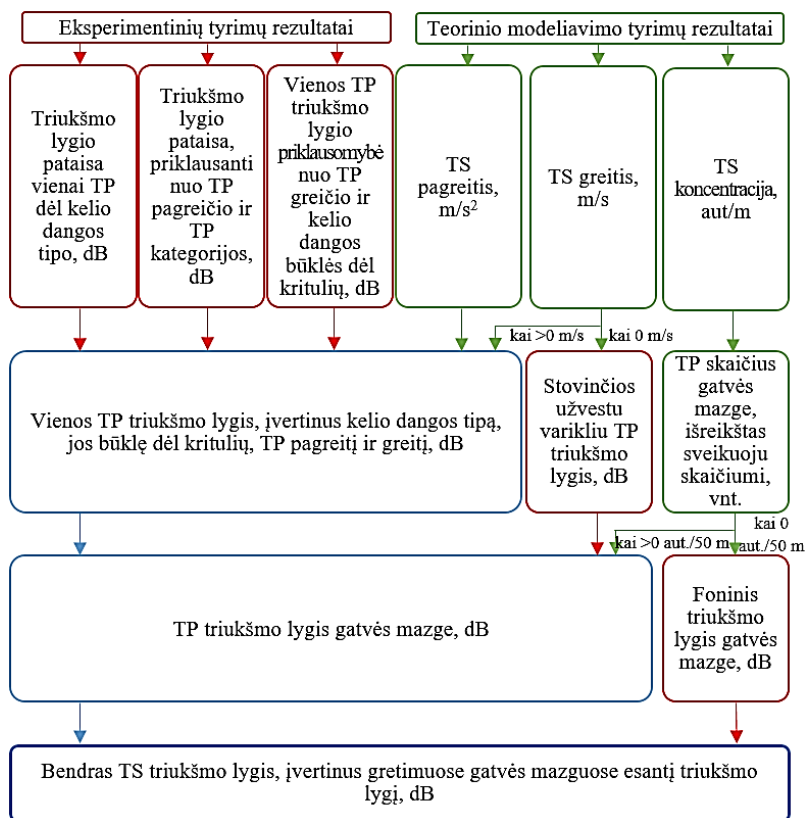
$$T_{opt, CO_2} = 27,5 \ln \left( \frac{T_{pr}}{1-q} \right) - 11,2. \quad (2.17)$$

Šviesoforų signalų nustatymo schema žaliajai bangai sudaroma taip, kad TP judėdama tos gatvės nustatytu leidžiamu pastoviu greičiu visose sankryžose paktėtų degant žaliajam signalui.

## 2.2. Transporto srauto skleidžiamo momentinio triukšmo lygio tyrimo metodika

Nustatant TS skleidžiamo momentinio triukšmo lygį (MTL) bet kuriuo laiko momentu, reikia žinoti jam įtakos turinčių parametų reikšmes, kintančias laike. TP skleidžiamam momentiniam triukšmui apskaičiuoti mes sukūrėme metodiką (MTLTM), kuri leidžia įvertinti TP judėjimo greitį, pagreitį ir TP koncentraciją atitinkamuose gatvės mazguose. Šie parametrai gaunami iš atlikto teorinio modeliavimo, panaudojus patobulintą DTSTM. Taip pat vertinamas kelio dangos tipas, TP tipas ir kelio dangos būklė dėl kritulių, kurių pataisos koeficientai gaunami iš eksperimentinių matavimų. TS skleidžiamo momentinio TL skaičiavimo seka pa-

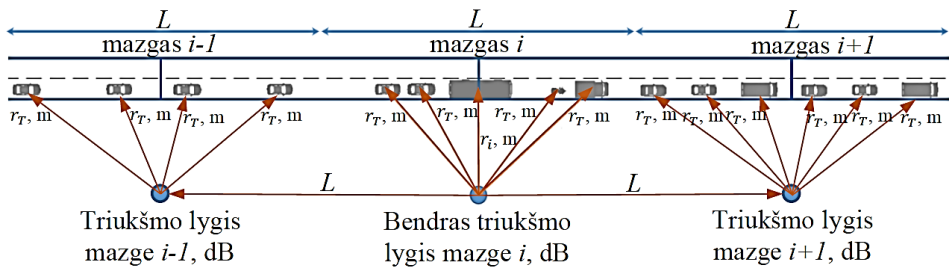
teikta 2.6 paveiksle ir ji aptariama šiame poskyryje. Ją sudaro dvi naudojamų duomenų grupės: teorinių tyrimų rezultatai ir eksperimentinių tyrimų rezultatai. Panaudojant patobulintą DTSTM, gaunami TS dinaminių procesų teorinių tyrimų rezultatai. MTLTM reikalingi TS greičio, pagreičio ir koncentracijos duomenys tam, kad būtų galima nustatyti, kaip nuo šių dinaminių TS parametrų kinta triukšmo lygis. Eksperimentinių tyrimų rezultatai skirti susieti TS dinaminių procesų parametrus su TP skleidžiamu TL. Iš eksperimentinių tyrimų MTLTM reikalingi šie rezultatai: kelio dangos ir padangos sąveikos metu skleidžiamo TL reikšmės, esant skirtingoms kelio dangoms; TL pokyčio priklausomybė nuo TP pagreičio ir TP kategorijos; atskirų TP kategorijų skleidžiamo TL priklausomybė nuo jų judėjimo greičio ir kelio dangos būklės dėl kritulių (sausas asfaltas, šlapias asfaltas, padengtas sniegu).



**2.6 pav.** Transporto srauto skleidžiamo momentinio triukšmo lygio skaičiavimo metodikos seka

**Fig. 2.6.** A sequence of methodology for calculation of instantaneous noise level emitted by traffic flow

Momentinis triukšmo lygis (MTL) skaičiuojamas kiekviename gatvės mazge, kuriame žinomas TS greitis, pagreitis ir koncentracija. Tam pirmiausia sudaroma MTL skaičiavimo schema (2.7 pav.), kurioje nurodoma triukšmo lygio nustatymo vieta. TP skleidžiamo momentinio triukšmo lygio skaičiavimo prie gatvės schemoje nurodyti atstumai  $L$  tarp gatvės mazgų,  $r_i$  – atstumas nuo TP iki atskaitos taško, kuriame žinomas TL, gaunamas iš eksperimentinių matavimų, ir  $r_T$  – atstumas nuo TP iki atskaitos taško, kuriame nežinomas TL, m.



**2.7 pav.** Transporto priemonių skleidžiamo momentinio triukšmo lygio skaičiavimo prie gatvės schema

**Fig. 2.7.** Scheme for calculating the instantaneous noise level of vehicles at the street

Iš gautų teorinių TP koncentracijos tyrimų rezultatų nustatomas TP skaičius (2.18) gatvės ruože aplink mazgus  $i - 1$ ,  $i$ ,  $i + 1$ , kuriuose skaičiuojamas triukšmo lygis:

$$N_i(t) = k(t) L_{i,i+1}, \quad (2.18)$$

čia  $k(t)$  – TP koncentracija, aut./m;  $L_{i,i+1}$  – gatvės elemento ilgis, m.

Gautas TP skaičius  $N_i(t)$  apvalinamas iki sveikąjį skaičių. Tokiu būdu galima identifikuoti atskirą TP kaip triukšmo šaltinį.

Iš eksperimentinių tyrimų rezultatų nustatoma vienos TP triukšmo lygio priklausomybė nuo jos greičio, TP tipo ir kelio dangos būklės. Remiantis eksperimentiniais duomenimis, sudaromos regresijos lygtys, kurios MTLTM susiejamos su teoriniais TS greičio duomenimis iš patobulinto DTSTM. Šios TL vertės toliau vienai TP patikslinamos naudojant pataisos koeficientus, kurie priklauso nuo TP pagreičio, kelio dangos tipo ir būklės.

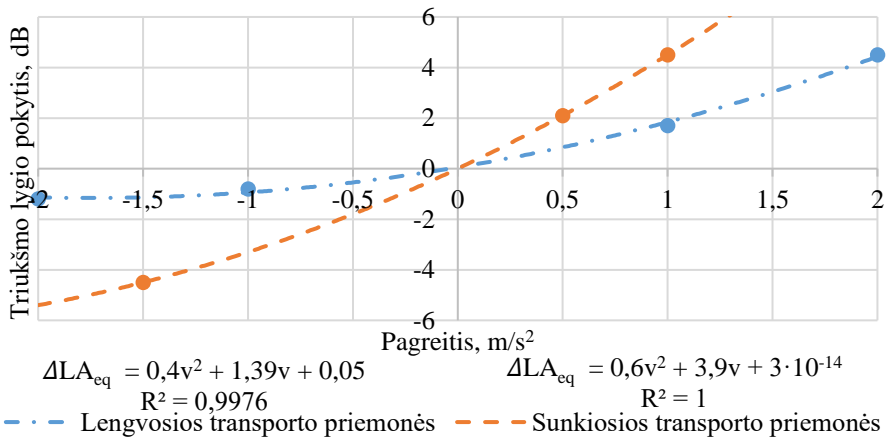
Žinoma TP koncentracijos reikšmė priskiriama skaičiuojamam mazgui, kuris apima po pusę gatvės elemento aplink tą mazgą. Todėl apskaičiuotas TP skaičius vienodais atstumais išskirstomas aplink gatvės mazgą. Tada kiekviena TP yra nutolusi skirtingais atstumais nuo TL skaičiavimo atskaitos taško (2.7 pav.). Tam patikslinamas TL priklausomai nuo atstumo iki atskaitos taško ir kiekvienos TP (2.19), dB (Hansen 2005).

$$LA_{eq,T} = LA_{eq,i} - 20 \log \left( \frac{r_T}{r_i} \right), \quad (2.19)$$

čia  $LA_{eq,i}$  – triukšmo lygis, esant atstumui  $r_i$ , dB;  $LA_{eq,T}$  – triukšmo lygis, esant atstumui  $r_T$ ;  $r_i$  – atstumas iki atskaitos taško, kuriame žinomas TL, m;  $r_T$  – atstumas iki atskaitos taško, kuriame nežinomas TL, m.

Jeigu teorinių skaičiavimų rezultatai rodo, kad tuo metu tiriamame mazge nėra jokių TP, imamas foninis triukšmo lygis, kuris gali būti skirtingas dėl netoli gatvės esančių kitų triukšmo šaltinių.

Lengvųjų ir sunkiųjų TP triukšmo lygio pokyčių dėl jų važiavimo pagreičio rezultatai publikuoti Ellebjerg (2007) mokslo ataskaitoje. Panaudojant ataskaitos TL pokyčio priklausomybės nuo TP pagreičių rezultatus, gautos regresijos kreivės ir jų lygtys (2.8 pav.). Jos parodo, kiek TL padidėja ar sumažėja esant tam tikriems greitėjimo ir lėtėjimo TP pagreičiams. Šios lygtys naudojamos vertinant TL pokyčius priklausomai nuo TP judėjimo pagreičio, kurių rezultatai gauti naudojant patobulintą DTSTM.



**2.8 pav.** Triukšmo lygio pokyčio priklausomybė nuo transporto priemonės pagreičio (Ellebjerg 2007)

**Fig. 2.8.** Noise level dependence on vehicle acceleration (Ellebjerg 2007)

TL pastovūs pataisos koeficientai dėl kelio dangos tipo (asfaltas, betonas, žvyras, grindinys) nustatomi eksperimentiniu CPX metodu. Naudojant gautus rezultatus, yra galimybė triukšmo lygį skaičiuoti skirtingais kelio paviršiais judančioms TP.

Įvertinus TP kategoriją (lengvosios, sunkiosios TP), greitį, pagreitį, kelio dangos tipą ir oro sąlygų (lietus, sniegas) įtaką, jam nustatomas vienos judančios TP skleidžiamas momentinis triukšmo lygis. Jeigu TP greitis lygus 0 m/s, imamas stovinčios TP įjungtu varikliu TL. MTLTM nevertinamos TP savybės, leidžiančios sustojus automatiškai užgesinti variklį naudojant „Start-stop“ sistemą.

Apskaičiuojamas TS bendras MTL (2.20) įvertinus kiekvienos TP tiriamame gatvės mazge skleidžiamą MTL šalia gatvės nutolusiame atskaitos taške, kuriame norima žinoti TL (Hansen 2005).

$$LA_{eq,T,sum} = 10 \log \left( \sum_{i=1}^n 10^{\left( \frac{LA_{eq,T}}{10} \right)} \right), \quad (2.20)$$

čia  $LA_{eq,T}$  – vienos TP skleidžiamas TL, kuris pasiekia šalia gatvės atskaitos tašką, dB.

Galiausiai apskaičiuojamas bendras MTL, kintantis laike, kiekviename gatvės mazge įvertinus gretimuose gatvės  $i-1$  ir  $i+1$  mazguose (2.7 pav.) MTL, žinant atstumus  $L$  tarp mazgų.

Siekiant tikslesnių rezultatų, ateityje tobulinant DTSTM, būtų galima įvertinti TS nehomogeniškumą, įvertinant skirtingų TP kategorijų judėjimo dinamišius procesus TS. Tobulinant MTLTM, būtų galima įvertinti transporto priemonių variklių keliamą triukšmą. Tokie tyrimai svarbūs triukšmo lygiui, kai miesto gatvėmis TP važiuoja nedideliu greičiu. Taip pat aktualu būtų įvertinti elektra varomų transporto priemonių, kurių daugėja miesto gatvėse, keliamą triukšmo lygį.

## 2.3. Antrojo skyriaus išvados

1. Palyginus DTSTM ir patobulinto DTSTM tyrimo rezultatus, gauti daugiau nei tris kartus artimesni eksperimentiniams TS greičio kitimo rezultatai per pirmąsias 20 s, kai užsidega žalias šviesoforo signalas. Praėjus nuo 20 s iki 40 s skirtumas sumažėjo iki 7,91 %. Taip pat perpus sutrumpėjo TS pereinamasis procesas iki nusistovėjusio greičio.
2. Patobulinto DTSTM TS greičio kitimo rezultatai, užsidegus žaliajam šviesoforo signalui, per pirmąsias 20 s skiriasi 31,4 %, o praėjus nuo 20 s iki 40 s skirtumas sumažėja iki 0,706 %.
3. Patobulintas DTSTM leido sukurti momentinio triukšmo lygio tyrimo metodą (MTLTM), kuriuo galima nustatyti momentinį triukšmo lygį, įvertinus kelio dangos tipą bei jos būklę, pakitusią dėl oro sąlygų, TP greitį, pagreitį ir TP koncentracijos rezultatus.



---

## **Transporto srauto dinaminių procesų ir jo skleidžiamo triukšmo eksperimentiniai tyrimai**

Šiame skyriuje pateikiama TS dinaminiam procesams tirti naudota įranga. TP rato ir kelio dangos sąveikos skleidžiamam triukšmui tirti didelio artumo (CPX) metodu naudota įranga. Taip pat keliu važiuojančios TP skleidžiamo triukšmo matavimo statistiniu (SPB) metodu tyrimams naudota įranga. Aprašoma eksperimentinių tyrimų metodika. Pateikiami eksperimentinių tyrimų rezultatai.

Skyriaus tematika paskelbtos dvi autoriaus publikacijos kartu su bendraautoriais (Junevičius *et al.* 2015; Danilevičius *et al.* 2018).

### **3.1. Matavimo prietaisų transporto srauto dinaminiam procesams tirti apžvalga**

Matavimo prietaisai, skirti TS dinaminiam procesams registruoti, gali būti montuojami kelio dangoje arba šalia kelio. Kelio dangoje montuojami prietaisai yra: indukcinų kilpų jutiklis, dviejų ašių magnetometras ir magnetinės indukcijos ritė.

Šalia kelio montuojami prietaisai: mikrobangų radaras, aktyvieji ir pasyvieji infraraudonųjų spindulių jutikliai, ultragarsinis jutiklis, akustinis jutiklis ir vaizdo jutiklis.

Indukcinių kilpų jutiklis susideda iš vielos, kuri yra susukta ir dažniausiai yra kvadrato, apskritimo arba stačiakampio formos ir yra montuojama į kelio dangą. Kada TP važiuoja per indukcinį jutiklį, keičiasi kilpos induktyvumas, kuris įtaisui leidžia aptikti važiuojančią TP, jos greitį bei ilgį.

TS parametrus matuoti naudojami dviejų tipų magnetinio lauko jutikliai. Pirmasis tipas, dviejų ašių magnetometras, nustato vertikalinių ir horizontalinių Žemės magnetinio lauko komponentų pokyčius, kuriuos sukelia TP. Šį prietaisą sudaro dvi pirminės ir dvi antrinės apvijos ant ritės, supančios didelio pralaidumo magnetinės medžiagos šerdį. Reaguodama į magnetinio lauko anomaliją, t. y. magnetometro elektroninė grandinė matuoja antrinių apvijų sukuriamą išėjimo įtampą. Esant TP, aptikimo išėjimas išlaikomas tol, kol transporto priemonė išvažiuoja iš aptikimo zonos. Antrasis magnetinio lauko jutiklio tipas yra magnetinis detektorius, tiksliau vadinamas magnetinės indukcijos rite. Jis aptinka TP išmatuodamas magnetinio srauto linijų iškraipymą, kurį sukelia judančios TP sukuriamas Žemės magnetinio lauko pokytis. Šie įtaisai turi vieną ritės apviją ant pralaidžios magnetinės medžiagos strypo šerdies. Magnetiniai detektoriai sukuria įtampą kaip judantis feromagnetinis objektas, kertantis Žemės magnetinį lauką.

Mikrobangų radaro veikimas pagrįstas radiolokaciniu principu. Mikrobangų signalas nutaikomas į judančią TP, o iš grįžusio signalo galima pasakyti kaip signalo dažnis pakito priklausant nuo TP judėjimo greičio. Iš gauto atspindėjusio signalo apskaičiuojamas tikslus TP greitis.

TS stebėjimams gaminami aktyvieji ir pasyvieji infraraudonųjų spindulių jutikliai. Aktyvusis infraraudonųjų spindulių jutiklis apšviečia aptikimo zonas mažos galios infraraudonųjų spindulių energija. Dalį perduotos energijos transporto priemonės atspindi arba išsibarsto atgal jutiklio link. Pasyviaisiais infraraudonųjų spindulių jutikliais TP fiksuojamos išmatuojant jų skleidžiamus infraraudonuosius spindulius, kurie spinduliuojami iš nustatytos aptikimo zonos. Fiksuojant transporto priemones, ignoruojami lėti kelio dangos temperatūros pokyčiai, sukelti besikeičiančių oro sąlygų.

Ultragarsinis jutiklis perduoda ultragarso energijos bangas ir matuoja atstumą, kurį įveikia atspindėta banga. Gali nustatyti TP skaičių, buvimą ir užimtumą juostose. Akustinis jutiklis matuoja TP greitį pasyviai aptikdamas TP skleidžiamą garsą.

Vaizdo jutiklių veikimo principas yra vaizdo atpažinimas. Vaizdo jutiklių sistemą paprastai sudaro viena ar kelios kameros, mikroprocesorinis kompiuteris, skirtas vaizdams suskaitmeninti ir analizuoti, ir programinė įranga, skirta vaizdams interpretuoti ir paversti juos TS duomenimis.

3.1 lentelėje išskirti dažniausiai naudojamų jutiklių technologijų privalumai ir trūkumai, atsižvelgiant į įrenginio tipą, matuojamus parametrus ir našumą, esant nepalankiam orui, kintamam apšvietimui ir permainingiems TS. Dauguma antžeminių jutiklių yra kompaktiški ir įrengiami virš ar šalia kelio, todėl yra gana paprastas jų įrengimas ir priežiūra. Kai kurių jutiklių įrengimo ir priežiūros darbai gali būti atliekami tik apribojus arba visiškai sustabdžius TP eismą, siekiant montuotojų ir vairuotojų saugumo (Klein 2001).

**3.1 lentelė.** Transporto srauto matavimo prietaisų privalumai ir trūkumai (Mimbela, Klein 2007)

**Table 3.1.** Strengths and weaknesses of traffic flow measuring devices (Mimbela, Klein 2007)

Prietaisai	Privalumai	Trūkumai
Indukcinių kilpų jutiklis naudojamas TP skaičiui, greičiui, atstumui tarp TP, judėjimo kryptčiai įrašyti ir TP klasifikavimui pagal TP ilgį.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lengvas pritaikymas įvairiems keliams.</li> <li>• Ištobulinta, gerai suprantama technologija.</li> <li>• Didelė patirties bazė.</li> <li>• Suteikia pagrindinius TS parametrus (eismo intensyvumas, greitis, atstumas tarp TP).</li> <li>• Nejautrus nepalankiam orui (lietui, rūkui ir sniegui).</li> <li>• Užtikrina geriausią matavimo tikslumą, palyginti su kitais dažniausiai naudojamais prietaisais.</li> <li>• TP klasifikavimo galimybė.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Įrengiant reikalingas kelio dangos pjūvis.</li> <li>• Netinkamas įrengimas sumažina kelio dangos eksploatavimo laiką.</li> <li>• Atliekant įrengimo ir priežiūros darbus, reikalingas eismo ribojimas.</li> <li>• Vielos kilpos yra veikiamos TS eismo ir temperatūros.</li> <li>• Reikalingos daugialypės kilpos stebint TP padėtį.</li> <li>• Galimi netikslumai nustatant TP klases.</li> </ul>
Dviejų ašių magnetometras naudojamas TP skaičiui, greičiui, atstumui tarp TP, judėjimo kryptčiai įrašyti.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ne toks jautrus eismo apkrovoms nei indukcinės kilpos.</li> <li>• Nejautrus nepalankiam orui (lietui, rūkui ir sniegui).</li> <li>• Kai kurie modeliai gali perduoti duomenis bevielio ryšio radijo bangomis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Įrengiant reikalingas kelio dangos pjūvis.</li> <li>• Netinkamas įrengimas sumažina kelio dangos tarnavimo laiką.</li> <li>• Atliekant įrengimo ir priežiūros darbus, reikalingas eismo ribojimas.</li> <li>• Modeliams su mažomis aptikimo zonomis reikia sudėtinių vienetų, kad būtų nustatytos visos eismo juostos.</li> </ul>

3.1 lentelės tęsinys

Prietaisai	Privalumai	Trūkumai
Magnetinio lauko jutiklis naudojamas TP skaičiui, greičiui, atstumui tarp TP, judėjimo kryptčiai įrašyti.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gali būti naudojamas, kai neįmanoma naudoti indukcinų kilpų (tiltuose).</li> <li>Kai kurie modeliai yra įrengiami po važiuojamąja kelio dalimi be dangos pjūvio, tačiau reikalingas grėžimas po kelio dangą.</li> <li>Nejautrus nepalankiam orui (lietui, rūkui ir sniegui).</li> <li>Ne toks jautrus eismo apkrovoms nei indukcinės kilpos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Įrengiant reikalingas kelio dangos pjūvis arba grėžimas po kelio dangą.</li> <li>Negali aptikti sustojusios TP, nebent naudojamos specialus jutiklių išdėstymas ir signalo apdorojimo programinė įranga.</li> </ul>
Mikrobangų radaras naudojamas TP skaičiui, greičiui, atstumui tarp TP, judėjimo kryptčiai įrašyti ir TP klasifikavimui pagal TP ilgį atskirose eismo juostose.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Paprastai nejautrus nepalankiam orui.</li> <li>Tiesioginis TP greičio matavimas.</li> <li>Veikia su keliomis eismo juostomis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nenutrūkstančių bangų Doplerio jutikliai gali neaptikti sustojusių arba lėtai judančių TP.</li> </ul>
Aktyvusis infraraudonųjų spindulių (lazerinis) jutiklis naudojamas TP skaičiui, greičiui, atstumui tarp TP, judėjimo kryptčiai įrašyti ir TP klasifikavimui pagal TP ilgį atskirose eismo juostose.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Siunčia keletą spindulių, kad tiksliai nustatytų TP padėtį, greitį ir klasę.</li> <li>Veikia su keliomis eismo juostomis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gali neveikti rūko metu, kai matomumas mažesnis nei 6 m ar esant pūgai.</li> <li>Atliekant įrengimo ir priežiūros darbus, įskaitant periodišką objektyvo valymą, reikalingas eismo ribojimas.</li> </ul>
Pasyvusis infraraudonųjų spindulių jutiklis naudojamas TP skaičiui, greičiui, atstumui tarp TP, judėjimo kryptčiai įrašyti.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Išdėstyti keliose zonose pasyvieji jutikliai matuoja TP greitį.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pasyviojo jutiklio jautrumas gali sumažėti esant stipriam lietui, sniegui ir tirštam rūkui.</li> <li>Kai kurie modeliai negali nustatyti TP padėties.</li> </ul>
Ultragarinis jutiklis naudojamas TP skaičiui, atstumui tarp TP, judėjimo kryptčiai įrašyti atskirose eismo juostose.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Veikia su keliomis eismo juostomis.</li> <li>Per aukštos TP aptikimo galimybė.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aplinkos sąlygos gali turėti įtakos veikimui (temperatūros kaita, stiprus vėjas).</li> <li>Esant dideliame eismo intensyvumui gali būti netikslūs duomenys.</li> </ul>

3.1 lentelės pabaiga

Prietaisai	Privalumai	Trūkumai
Akustinis jutiklis naudojamas TP skaičiui, greičiui, atstumui tarp TP, judėjimo kryptčiai įrašyti atskirose eismo juostose.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pasyvus aptikimas.</li> <li>• Nejautrus krituliams.</li> <li>• Kai kurie modeliai veikia su keliomis eismo juostomis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Žema temperatūra gali turėti įtakos TP skaičiavimo tikslumui.</li> <li>• Specifiniai modeliai nerekomenduojami lėtame ir nuolat sustojančių ir vėl pradedančių judėti TP eisme.</li> </ul>
Vaizdo jutiklis naudojamas TP skaičiui, greičiui, atstumui tarp TP, judėjimo kryptčiai įrašyti ir TP klasifikavimui pagal TP ilgį atskirose eismo juostose.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stebi kelias eismo juostas ir keletą nustatytų zonų juostų.</li> <li>• Lengva pridėti ir keisti aptikimo zonas</li> <li>• Didelis pasiekiamų duomenų rinkinys.</li> <li>• Renkama informacija vienoje stebėjimo vietoje gali būti sujungta su kita.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kai kamera pritvirtinta virš kelio, atliekant įrengimo ir priežiūros darbus, įskaitant periodišką objektyvo valymą, reikalingas eismo uždarymas (eismas gali būti neuždarytas, kai kamera pritvirtinta šalia kelio).</li> <li>• Turi įtakos nepalankus oras: rūkas, lietus, sniegas ir TP šešėliai, TP projekcija į gretimą eismo juostą, užtvaros, dienos ir naktį perėjimas, TP ir kelio dangos kontrastas, vanduo, druskų nešvarumai, varvekliai ir voratinkliai ant objektyvo.</li> <li>• Patikimam signalo gavimui naktį reikalingas gatvių apšvietimas.</li> <li>• Reikalingas 9–15 m kameros įrengimo aukštis (šoninio įrengimo konfigūracijos) optimaliam padėties ir greičio nustatymui.</li> <li>• Kai kurie modeliai jautrūs stipriam vėjui ar vibracijoms.</li> <li>• Didelė įrangos kaina.</li> </ul>

Duomenis, kuriuos galima gauti iš kiekvieno jutiklio technologijos veikimo zonoje, ir ryšio pralaidumo galimybes pateikia Bellucci, Cipriani (2005). Funk-

cionaliausios jutiklių technologijos yra mikrobangų radaras, aktyvusis infraraudonųjų spindulių jutiklis ir vaizdo apdorojimo jutiklis. Šie jutikliai gali nustatyti TP skaičių, atstumą tarp TP, judėjimo kryptį, TP padėtį, greitį, suklasifikuoti į kategorijas bei stebėti kelias juostas. Kitos radarų technologijos turi mažiau funkcijų. Indukcinėmis kilpomis nėra galimybės nustatyti, kuria eismo juosta juda TP. Akustinis radaras nesuteikia galimybės klasifikuoti TP. O dviejų ašių magnetometras, magnetinio lauko jutiklis, pasyvusis infraraudonųjų spindulių ir ultragarso jutikliai neturi abiejų minėtų pastarųjų funkcijų.

TS matavimo technologijų jautrumas aplinkai įvertintas Bellucci, Cipriani (2010). Matavimo prietaisams vertinti paskirta 5 balų skalė, kai 0,5 balo atitinka labai mažą jautrumą, o 5 balai atitinka labai didelį jautrumą. Vaizdo, indukcinį kilpų, lazerinių jutiklių jautrumas atmosferos ir lietaus įtaka jautrumui būtų lygi 1 balui. Indukcinėms kilpoms apšvietimo ir eismo įtaka vertinama 0,5 balo. Lazeriniams jutikliams eismo įtaka vertinama 1 balu, o jautrumas apšvietimui 1,5 balo. Vaizdo jutikliams jokios neigiamos įtakos neturi eismo intensyvumas, bet jie labai jautrus apšvietimui. Tokio tipo jutiklių jautrumas apšvietimui vertinamas 5 balais.

## **3.2. Naudoti matavimo prietaisai transporto srauto dinaminiam procesams ir transporto priemonių skleidžiamam triukšmui tirti**

### **3.2.1. Matavimo prietaisas transporto srautų dinaminiam procesams tirti**

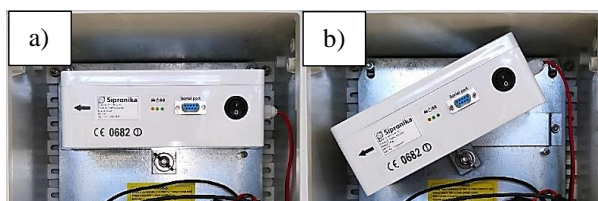
Eksperimentiniams TS dinaminių procesų tyrimams pasirinktas TS skaitiklis klasifikatorius TC25 su Doplerio radaro greičio jutikliu. Šiuo prietaisu per tam tikrą laiko trukmę įrašomas eisme dalyvaujančių TP skaičius ir jų vidutinis greitis. Taip pat TP klasifikuojamos pagal jų ilgį. Vidinėje atmintyje gali saugoti iki 300 000 duomenų apie pravažiavusių TP skaičių, greitį, ilgį, judėjimo kryptį ir saugų atstumą iki ankstesnės TP.

TC25 techniniai parametrai. TP gali būti klasifikuojamos į 10 greičio intervalų ir iki 6 TP grupių, kurios konfigūruojamos su programine įranga. Veikimo dažnis 24,125 GHz / 5 mW. Veikimo principas paremtas Doplerio efektu. Darbinė prietaiso temperatūra nuo  $-25^{\circ}\text{C}$  iki  $60^{\circ}\text{C}$ .

Yra du pagrindiniai būdai parenkant tinkamą prietaiso įrengimo aukštį pagal galimas sąlygas.

Pirmasis įrengimo būdas. Įrengiamas skaitiklis maždaug 1 m nuo žemės paviršiaus aukštyje. Vidinis korpusas nukreipiamas į horizontalią padėtį

(3.1 a. pav.). Šio būdo privalumas tas, kad lengva nustatyti tinkamą matavimo kampą ir gerai aprėpia kelias eismo juostas. Tokio įrengimo trūkumas yra tas, kad dažniausiai artimiausioje eismo juostoje esančios TP užstoja kitomis eismo juostomis važiuojančias TP.



**3.1 pav.** TC25 transporto srauto skaitiklio klasifikatoriaus vidinio korpuso padėtis:

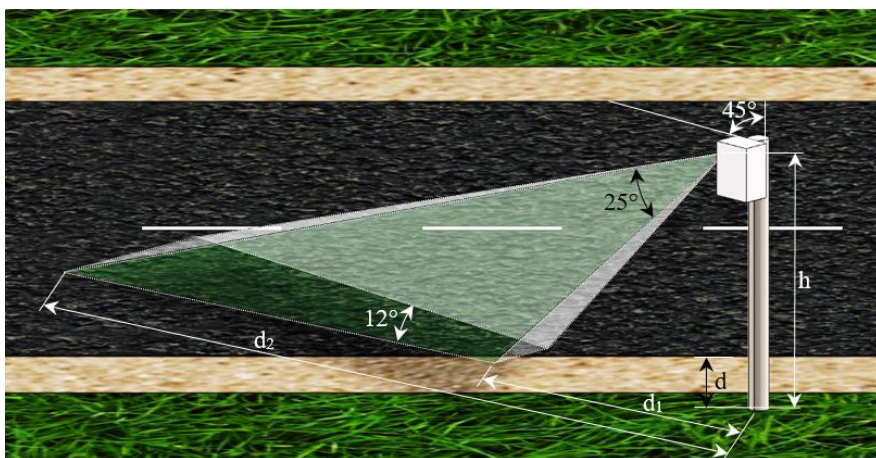
a) horizontali; b) pakreipta 30° kampu

**Fig. 3.1.** TC25 Traffic counter internal housing position:

a) horizontal; b) inclined at 30°

Antrasis įrengimo būdas. Įrengiama didesniame aukštyje priklausomai nuo stulpo atstumo nuo kelio. Vidinis korpusas šiuo atveju turi būti pakreiptas 30° (3.1 b. pav.). Šis metodas reikalauja daugiau dėmesio nustatant atitinkamą aukštį atsižvelgiant į atstumą nuo kelio ir nustatant kampą prieš važiavimo kryptį. Aukštis ir atstumas turi būti nustatytas taip, kad prietaiso spindulys apimtų visas eismo juostas, kurias norima matuoti (3.2 pav.).

Tiksliems matavimams būtina tiksliai nustatyti kampą tarp TS važiavimo krypties ir skaitiklio įrengimo krypties. Pirmuoju įrengimo būdu TS skaitiklis klasifikatorius nukreipiamas 45° kampu į važiavimo kryptį (3.2 pav.).



**3.2 pav.** TC25 transporto srauto skaitiklio klasifikatoriaus stebėjimo srities nustatymas

**Fig. 3.2.** Setting the TC25 traffic flow counter classifier observation area

Kai skaitiklis yra iškeltas virš TP, prietaiso pasukimo kampas nėra  $45^\circ$ . Įrengimo kampas nustatomas pagal 3.2 lentelėje pateiktas reikšmes pagal aukštį ir atstumą nuo kelio ir nustatyta vertė įrašoma į prietaisą, naudojant TC programinę įrangą. Matuojant kelias eismo juostas, turi būti laikoma, kad kampai į atskiras eismo juostas yra skirtingi. Taigi atskirų juostų matavimo tikslumas gali skirtis.

**3.2 lentelė.** Transporto srauto skaitiklio klasifikatoriaus reguliavimo kampo reikšmės (Sipronika 2012)

**Table 3.2.** Adjustment angle values of Traffic flow counter classifier (Sipronika 2012)

Aukštis $h$ , m	Atstumas $d$ , m						
	2	3	4	5	6	7	8
2	55	50	48	47	/	/	/
3	61	55	51	49	48	/	/
4	/	59	55	52	50	49	48
5	/	58	55	52	51	50	50

Stebėjimo sritis priklauso nuo atstumo iki stulpo, ant kurio pritvirtintas prietaisas ir nuo jo tvirtinimo aukščio. Dažniausiai matavimo sritis yra didesnė, jei prietaisas yra sumontuotas aukščiau, taip aprėpiant daugiau eismo juostų. Prietaiso stebėjimo sritis parodyta 3.2 paveiksle. Spindulio plotis  $12^\circ$ . Prietaiso stebėjimo sritis apskaičiuojama, priklausomai nuo įrengimo aukščio  $h$  ir atstumo nuo važiuojamosios kelio dalies  $d$  (3.1 ir 3.2):

$$d_1 = 1,09h ; \quad (3.1)$$

$$d_2 = 3,17h . \quad (3.2)$$

Saugomi duomenys perduodami į kompiuterį tiesiogiai jį prijungus per RS232 jungtį arba nuotoliniu būdu per „Bluetooth“ arba GPRS / EDGE. Šie duomenys statistškai apdorojami su priedais, skirtais „MS Excel“, ir vizualizuoti lentelėmis ar diagramomis.

Prieš pradedant apdoroti gautus duomenis, rekomenduojama ištrinti pirmąją ar kelias pirmąsias duomenų eilutes, kadangi į pirmąją paprastai įrašoma nevisingai nustatyto laiko intervalu duomenys, o į kitas pirmąsias gali būti įrašytos ne visos TP atliekamų įrenginio padėties koregavimo darbų metu. Šie matavimo pradžios duomenys gali labai iškreipti gautus tyrimo rezultatus.

### 3.2.2. Matavimo prietaisas transporto priemonių rato ir kelio dangos sąveikos skleidžiamam triukšmui tirti CPX metodu

Matavimai buvo atlikti su Transporto tyrimų centro (Čekija) Brno originalios konstrukcijos specializuota priekaba (3.3 pav.), atitinkančia ISO 11819-2 (2017)



reikalavimus. Kadangi naudojamos padangos yra didžiausia neapibrėžtis matuojant triukšmą, todėl buvo naudojama rekomenduojama standartinė padanga 225/60 R16 SRTT, ISO 11819-3 (2017). Kiekvienais metais tokiai padangai atliekami bandymai nusidėvėjimo ir skilimo įtakai mažinti. Etaloninės padangos nusidėvėjimas neturi viršyti 1 mm nuo pradinio protektoriaus rašto gylio. Prieš matuojant padanga kaitinama maždaug 20 minučių iki darbinės temperatūros. Viso matavimo metu matuojamas padangos ir kelio paviršiaus sąveikos skleidžiamas akustinis slėgis, kurį fiksuoja 5 numatytu atstumu išdėstyti mikrofonai. Matavimai atliekami 50 km/h ir 80 km/h greičiu, priklausomai nuo kelio kategorijos: 50 km/h esant mažo greičio kelio kategorijai ir 80 km/h – vidutinio greičio kelio kategorijai. Mažo greičio kelio kategorija – kai sąlygos, susijusios su eismu, judančiu vidutiniu greičiu nuo 45 km/h iki 64 km/h, o vidutinio greičio kelio kategorija – nuo 65 km/h iki 99 km/h. Kiekvieno matavimo metu registruojamas važiavimo greitis, kelio dangos paviršiaus temperatūra ir aplinkos oro temperatūra.



**3.3 pav.** Matavimo prietaisas, skirtas transporto priemonės ratų ir kelio dangos sąveikos triukšmui tirti CPX metodu

**Fig. 3.3.** Measuring device for analyzing tyre-road contact generated noise upon applying the CPX method

Matavimo įrangą sudaro: rėmas iš apvalaus profilio vamzdžių, kad būtų išvengta garso atspindžių. Kelio paviršiaus temperatūra nuolat matuojama CALEX – PC21MT-0 temperatūros jutikliu, o oro temperatūra – SENECA PT100 temperatūros jutikliu. Nuolatinis greičio matavimas atliekamas naudojant GPS modulį UA-9004 RLVBS1. Triukšmo lygis, atsirandantis dėl kelio paviršiaus ir padangos sąveikos, matuojamas „Brüel & Kjær“ triukšmo analizatoriaus mikrofonais, kurio matavimo dažnių diapazonas yra nuo 0 iki 51,2 kHz (Krivanek *et al.* 2017).

Ant specializuotos priekabos sumontuoti specialūs stovai 5 mikrofonomams, kurie išdėstyti pagal ISO 11819-2 (2017) standarto reikalavimus. Visi 5 mikrofonomai montuojami šalia vieno dešiniojo rato. Tokiu būdu siekiama išvengti lenkiančių TP skleidžiamo triukšmo.

### 3.2.3. Matavimo prietaisas transporto priemonių skleidžiamam triukšmui tirti SPB metodu

„Brüel & Kjær 2250“ (3.4 pav.) yra rankinis analizatorius, turintis vieno kanalo įvestį mikrofoniui, akcelerometru arba kitiems jutikliams. Triukšmo lygio matuoklio dažnio diapazonas yra nuo 3 Hz iki 20 kHz naudojant kartu su 4189 tipo mikrofoniui. Šio tipo mikrofoniui triukšmo lygis gali būti nustatomas nuo 16,6 dB iki 140 dB.

Naudojamo 4189 tipo mikrofono specifikacijoje nurodytas temperatūros koeficientas  $-0,006 \text{ dB}/^{\circ}\text{C}$ . Pagal tai išmatuoti TL duomenys perskaičiuojami į  $20^{\circ}\text{C}$  oro temperatūrą atitinkančią TL pagal (3.3) formulę:

$$LA_{eq,20^{\circ}\text{C}} = LA_{eq,^{\circ}\text{C}} - \frac{20 - T_{oro}}{0,006}, \quad (3.3)$$

čia  $LA_{eq,^{\circ}\text{C}}$  – išmatuotas triukšmo lygis, esant temperatūrai  $T_{oro}$ , dB;  $T_{oro}$  – oro temperatūra eksperimento metu,  $^{\circ}\text{C}$ .



3.4 pav. Brüel & Kjær 2250 triukšmo analizatorius  
Fig. 3.4. Brüel & Kjær 2250 noise analyzer

„Brüel & Kjær 2250“ triukšmo analizatoriaus funkcijai sukonfigūruotas įrenginys, TS triukšmo įrašymo metu įprastai naudojamos apsaugos, slopinančios vėjo gūsių skleidžiamą garsą. Siekiant išvengti garso atspindžių nuo šalia esančių objektų, rekomenduojama triukšmo analizatorių tvirtinti ant jam skirtos stovo, jį pakeliant aukščiau nuo žemės.

Triukšmo analizatoriaus įrašyti duomenys apdorojami programine įranga *Brüel & Kjær – Measurement Partner Suite*. Su šia programine įranga atliekamas prietaiso konfigūravimas, įrašytų duomenų analizavimas. Įrašyti duomenys eksportuojami į kompiuterį tolesnei TL analizei.

### 3.3. Transporto srauto dinaminių procesų eksperimentiniai tyrimai

TS eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami siekiant nustatyti TS dinaminius procesų parametrus, jam padedant prie sankryžos, užsidegus žaliajam šviesoforo signalui. Šie tyrimai buvo reikalingi tam, kad būtų galima patikslinti DTSTM  $r_{k_i, in, i, j}$  ir  $r_{k_i, out, i, j}$  koeficientus, leidžiančius gauti tikslesnius TS judėjimo rezultatus.

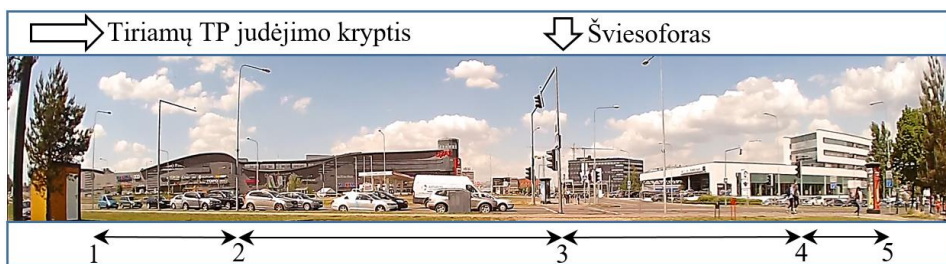
Eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami Ozo g., Vilniuje, panaudojant vaizdo kamerą. Analizuojant kameros vaizdo įrašą, galima tiksliai nustatyti TP pajudėjimo laiką ir jos judėjimą. Dauguma TS registruojančių prietaisų lėtai judančių TP nepastebi. Ši gatvė pasirinkta dėl didelio eismo intensyvumo. TS registravimo metu buvo geras matomumas, be kritulių, dienos metas. Analizuojant vaizdo įrašą, matomame gatvės ruože pažymėti penki atskaitos taškai (3.5 pav.), tarp kurių žinomas atstumas. Vienu iš atskaitos taškų pažymėta vieta su šviesoforu (3 taškas). Ties juo užsidegus žaliajam šviesoforo signalui pradeda formotis TP eilė. Užsidegus žaliajam šviesoforo signalui, TP vėl pradeda judėti delsdama. Judant TP ir joms kertant pažymėtus atskaitos taškus užrašoma trukmė, per kurią TP įveikia atstumą tarp taškų. Tada apskaičiuojamas TP greitis pagal (3.4) lygtį ir pagreitis pagal (3.5) lygtį. Taip pat užrašomas atskirų TP delsimas padedant.

$$v = \frac{s}{t}, \quad (3.4)$$

čia  $s$  – nuvažiuotas atstumas, m;  $t$  – laikas, s.

$$a_i = \frac{v_i - v_{i-1}}{t}, \quad (3.5)$$

čia  $v_i$  – greitis taške  $i$ , m/s;  $v_{i-1}$  – greitis taške  $i-1$ , m/s;  $t$  – laikas, s.

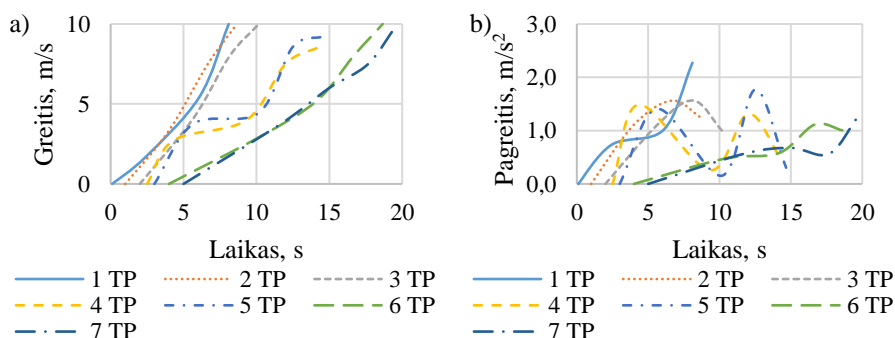


**3.5 pav.** Ozo g. stebėjimo zona TP judėjimui nustatyti įsijungus žaliajam šviesoforo signalui

**Fig. 3.5.** Ozo str. monitoring area to detect the movement of vehicles, when traffic light switches to green

Rezultatai rodo (3.6 pav.) vieno iš šviesoforo ciklų, kaip skirtingai atskiros TP pajuda užsidedus žaliajam šviesoforo signalui (A priedas (A1–10 pav.)). Degant raudonam šviesoforo signalui, stovėjusios TP eilėje pradeda judėti viena paskui kitą delsdama, kai užsidega žalias šviesoforo signalas. Pirmosios TP pradeda judėti didesniu pagreičiu (3.6 b. pav.), nes joms nėra kliūtis priekyje, kuri galėtų riboti jų greitį. Dėl to greičiau pasiekia didesnę greitį (3.6 a. pav.). Toliau nuo TP eilės priekio buvusios TP pradeda judėti reaguodamos į šviesoforo signalą ir priekyje esančias TP. Todėl įsibėgėja lėčiau, mažesniu pagreičiu, nes joms reikia laiktis saugaus atstumo iki priekyje esančių TP.

TP delsimo laiko pajudant rezultatai svarbūs siekiant nustatyti, kaip TS juda pirmosiomis sekundėmis. Atskirų TP priemonių greitis didėja praktiškai pagal tiesinę priklausomybę (3.6 a. pav.).

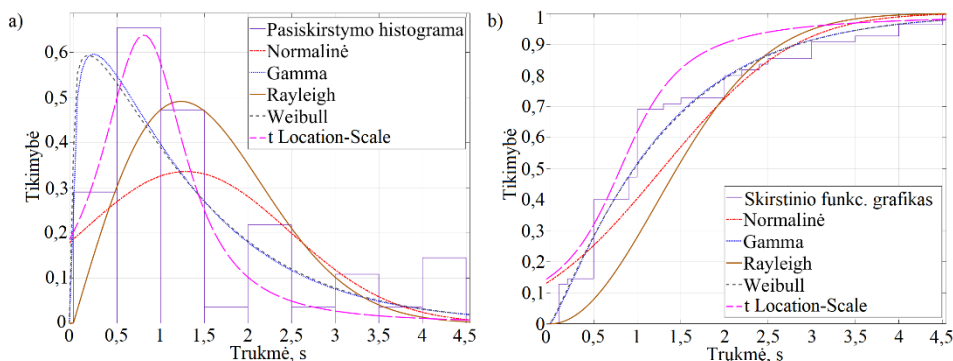


**3.6 pav.** Septynių pirmųjų transporto priemonių judėjimas užsidedus žaliajam šviesoforo signalui: a) greičio; b) pagreičio priklausomybės nuo laiko

**Fig. 3.6.** Movement of the first seven vehicles, when traffic light switches to green: a) velocity; b) acceleration vs. time

Bet vertinant jų delsimą pajudant ir išvedus visų TP tiriamame gatvės mazge greičio vidurkį atskirais laiko momentais gaunamas mažesnis TS greitis (2.2 pav.) dėl vis dar stovinčių TP. Kai visos TP juda, bendras TS greitis pradeda didėti sparčiau.

Tyrimo rezultatai rodo A priedas (A1 lentelė), kad pirmoji TP, užsidegus žaliajam šviesoforo signalui, pajuda delsdama nuo 0,1 s iki 1 s. TP delsimo laiko pajudant pasiskirstymo histograma su skirstinio kreivėmis (3.7 a. pav.) sudarytos iš 10 šviesoforo ciklų, per kuriuos užregistruota 55 TP pajudėjimo laiko rezultatai. Šie rezultatai rodo, kokie vyrauja TP eilėse atskirų TP delsimo laikai pajudant, kai užsidega žalias šviesoforo signalas ir pradeda judėti priekyje esanti TP. Remiantis rezultatais, galima teigti, kad vairuotojų reakcijos trukmė yra nuo 0 iki 4,5 s, bet dažniausiai pasitaikantis yra nuo 0,5 iki 1,5 s. Skirstinio funkcijos grafikas su skirstinio kreivėmis (3.7 b. pav.) rodo TP pajudėjimo delsimo tikimybę. Kuo aukštesni laipteliai skirstinio funkcijos grafike tuo didesnė tos reikšmės tikimybė pasikartoti. Taip pat funkcijos grafiko ir skirstinio kreivės geresnis sutapimas nurodo, kuri skirstinio kreivė yra tinkamiausia naudoti TP delsimui vertinti, modeliuojant TS.



**3.7 pav.** Transporto priemonių pajudėjimo delsimo laiko: a) pasiskirstymo histograma su skirstinio kreivėmis ir b) skirstinio funkcijos grafikas su skirstinio kreivėmis

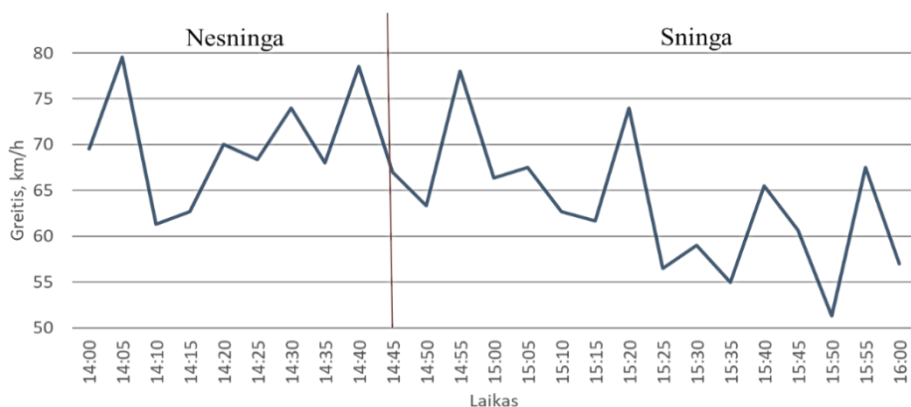
**Fig. 3.7.** Vehicle movement delay time: a) distribution histogram with the distribution curves, b) graph of the cumulative distribution function with distribution curves

Transporto priemonių delsimo laiko skirstinio funkcijos grafiko ir skirstinio kreivių sutapimui nustatyti buvo apskaičiuota paklaida tarp jų pagal (2.6) lygtį. Atskirų skirstinio kreivių paklaidos, nuo skirstinio funkcijos grafiko, pateiktos 3.3 lentelėje. Pagal gautus rezultatus, Weibull skirstinio kreivė, kurios paklaida 5,51 %, yra tinkamiausia TP delsimui vertinti, modeliuojant TS.

**3.3 lentelė.** Empirinio skirstinio atitiktis teoriniams skirstiniams**Table 3.3.** Correspondence of empirical distribution to theoretical distributions

Skirstinio kreivė	Normalinė	Gamma	Rayleigh	Weibull	t Location Scale
Paklaida, %	11,3	6,41	18,9	5,51	7,09

Siekiant nustatyti, kokią įtaką turi pakitusios aplinkos oro sąlygos TP greičiui, buvo atlikti eksperimentiniai tyrimai žiemos metu, prieš pradedant snigti ir intensyviai sningant. Tyrimai buvo atliekami Kairėnų g., Vilniuje. Šioje gatvėje leidžiamasis TP greitis yra 70 km/h. TP vidutinis greitis buvo įrašomas TC25 TS skaitikliu klasifikatoriumi. Prietaisas buvo pastatytas 2 m atstumu nuo važiuojamosios kelio dalies, 1 m aukštyje, nukreiptas  $45^\circ$  į kelią. TP vidutinis greitis prieš sningant yra 70 km/h (3.8 pav.). Pradėjus intensyviai snigti, sumažėjo matomumas ir sniego sluoksnis ant kelio dangos storėjo. Todėl automobilių greitis pradėjo mažėti, o pasidengus asfalto dangai sniegu, vidutinis transporto priemonių greitis sumažėjo iki 63 km/h.

**3.8 pav.** Transporto srauto greičio pokytis skirtingomis oro sąlygomis**Fig. 3.8.** Change in traffic flow rate under different weather conditions

Iš šių duomenų nustatyta, kad pablogėjus matomumui ir pakitus kelio dangos būkle dėl sniego, TP vidutinis greitis sumažėjo apie 10 %. Vidutinė TP greičio sumažėjimo vertė gauta nustačius vidutinį TP greitį iki pradedant snigti ir sningant. Tada skirtumas tarp šių dviejų reikšmių apskaičiuotas pagal (2.6) lygtį. Šį greičio sumažėjimą būtina įvertinti, kad būtų pasiekti tikslesni TS modeliavimo rezultatai.

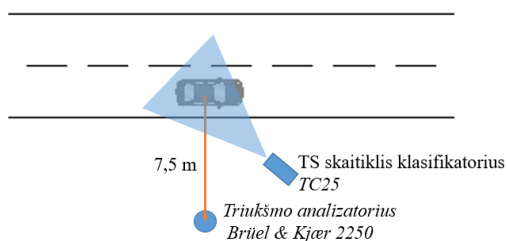


### 3.4. Transporto priemonių skleidžiamo triukšmo lygio eksperimentiniai tyrimai

Pagal sukurtą MTLTM reikia žinoti: TP skleidžiamo TL priklausomybę nuo jos greičio ir kelio dangos būklės, TL pokyčio priklausomybę nuo TP pagreičio ir skleidžiamo TL rato ir kelio dangos sąveikos metu esant skirtingoms kelio dangoms.

Siekiant gauti TP skleidžiamo TL priklausomybes nuo jos greičio ir kelio dangos būklės eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami pagal kelių važiuojančios transporto priemonės skleidžiamo triukšmo matavimo statistiniam metodui (SPB – angl. *Statistical Pass-By*) ISO 11819-1 (2002) standarte nurodytas instrukcijas. Remiantis instrukcijomis, aplink mikrofoną, mažiausiai 25 m spinduliu, neturi būti jokių objektų, kurie galėtų atspindėti garsą, ir 60 m nuo registruojamos TP neturi būti kitų TP. Taip pat turi būti vengiama stiprių aplinkos garsų, kurie turi įtakos tyrimo rezultatų patikimumui. Judriose miesto gatvėse sudėtinga rasti tokias sąlygas atitinkančią vietą. Todėl buvo pasirinkta Vilniaus miesto Kairėnų g., kurioje užtikrinamos šios sąlygos. Šiems tyrimams atlikti naudoti prietaisai: triukšmo analizatorius *Brüel & Kjær 2250* ir TC25 TS skaitiklis klasifikatorius. Tyrimai buvo atliekami Kairėnų g., Vilniuje. Tyrimo vietoje buvo asfaltbetonio, turinčio iki 11 mm skaldos savo sudėtyje (AC 11), kelio danga be pažaidų.

Triukšmo analizatorius *Brüel & Kjær 2250* buvo statomas atviroje vietoje, kad mažiausiai 10 m atstumu nebūtų garsą atspindinčių objektų. Prietaisas su mikrofonomu tvirtinamas ant jam skirtos stovo 1,2 m aukštyje pakeltam nuo žemės ir 7,5 m atstumu nuo tiriamos eismo juostos vidurio (3.9 pav.). Įjungtas triukšmo analizatorius paliekamas nepertraukiamai įrašinėti TL šalia kelio.

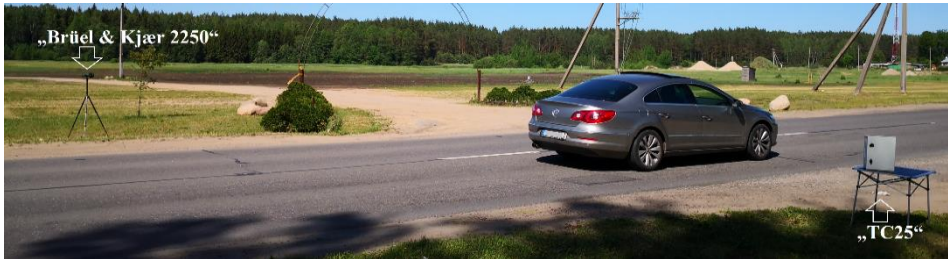


**3.9 pav.** Prietaisų išdėstymas šalia gatvės, triukšmo lygio matavimams SPB metodu

**Fig. 3.9.** Location of devices for noise level measurements by SPB method near the street

TC25 TS skaitiklis klasifikatorius buvo pastatytas 2 m atstumu nuo važiuojamosios kelio dalies, 1 m aukštyje, nukreiptas  $45^\circ$  į kelią taip, kad registruojamos TP padėtis būtų priešais triukšmo analizatorių tiksliai tuo pačiu metu. Prieš atlie-

kant TP registraciją, triukšmo analizatoriaus *Brüel & Kjær 2250* laikrodis sinchronizuojamas pagal TC25 TS skaitiklio klasifikatoriaus laikrodį. Registruojamos TP realiuoju laiku, užrašant registravimo laiką, kiekvienos TP greitį ir TP kategoriją (motociklas, lengvasis automobilis, mikroautobusas, autobusas, mažas sunkvežimis, didelis sunkvežimis). Registruojama TP priemonė tik tada, kai gretimoje eismo juostoje ir testuojamoje eismo juostoje nėra kitų TP (3.10 pav.). TP registruojamos tik važiuojančios ta juosta, kurios vidurys nutolęs 7,5 m nuo mikrofono.



**3.10 pav.** Triukšmo lygio matavimai SPB metodu  
**Fig. 3.10.** Noise level measurements by SPB method

Atlikus TP registravimą, triukšmo analizatoriaus *Brüel & Kjær 2250* įrašyti duomenys perkeliami į kompiuterį ir atrenkamos TL vertės atitinkamu laiku, kai buvo registruojamos TP. Taip gaunama atskirų TP skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybė nuo TP greičio.

TL eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti 10 kartų (iš viso 14 val.) skirtingomis dienomis ir oro sąlygomis, kurių metu kito oro temperatūra, tačiau be vėjo. Dėl temperatūros skirtumo eksperimento metu duomenys buvo perskaičiuoti į 20 °C oro temperatūrą atitinkantį TL pagal (3.3) formulę.

Kad šiuos duomenis būtų galima susieti su patobulinto DTSTM gautais greičio rezultatais, nustatomos tinkamiausios atskiroms TP kategorijoms regresijos kreivės ir jų lygtys pagal didžiausią determinacijos koeficientą  $R^2$ .

Nustačius tinkamiausias regresijos lygtis ir pritaikius Podvezko, Sivilevičius (2013) naudojamą lygtį (3.6), randamas Pirsono koreliacijos koeficientas. Pagal koreliacijos koeficiento dydį daromos išvados apie koreliacinio ryšio stiprumą.

$$r_{v_i, LA_{eqi}} = \frac{m \cdot \sum_{i=1}^m v_i \cdot LA_{eqi} - \sum_{i=1}^m v_i \cdot \sum_{i=1}^m LA_{eqi}}{\sqrt{m \cdot \sum_{i=1}^m v_i^2 - \left( \sum_{i=1}^m v_i \right)^2} \cdot \sqrt{m \cdot \sum_{i=1}^m LA_{eqi}^2 - \left( \sum_{i=1}^m LA_{eqi} \right)^2}}, \quad (3.6)$$

čia  $m$  – registruotų TP skaičius;  $v_i$  –  $i$ -tosios TP greitis, km/h;  $LA_{eqi}$  –  $i$ -tosios TP skleidžiamas TL, dB.



Regresijos kreivės koreliacijos koeficientas nurodo ryšio stiprumą, kurio reikšmių skalė pateikta 3.4 lentelėje.

**3.4 lentelė.** Koreliacijos koeficiento reikšmių skalė (Mukaka 2012)

**Table 3.4.** Scale of correlation coefficient values (Mukaka 2012)

Labai stipri	Stipri	Vidutinė	Silpna	Labai silpna	Nėra ryšio
$\pm 1$	nuo $\pm 1$ iki $\pm 0,7$	nuo $\pm 0,7$ iki $\pm 0,5$	nuo $\pm 0,5$ iki $\pm 0,2$	nuo $\pm 0,2$ iki 0	0

Regresijos kreivės koreliacijos koeficientas turi būti ne mažesnis už apskaičiuotą mažiausią koreliacijos koeficiento reikšmę (3.7) (Podvezko, Sivilevičius 2013). Tik tokiu atveju gauta regresijos kreivė koreliuoja su gautais eksperimentiniais rezultatais.

$$r_{\min} = \frac{t_{\alpha,n}}{\sqrt{m-2+t_{\alpha,n}^2}}, \quad (3.7)$$

čia  $t_{\alpha,n}$  – Stjudento koeficientas esant  $n = m - 2$  laisvės laipsniui ir  $\alpha$  pasiklovimo lygmeniui.

Pasikliautinojo intervalo ribos, kuriose, tikėtina, yra matuojamo dydžio parametras, apskaičiuojamos pagal (3.8) lygtį (Hespanhol *et al.* 2019):

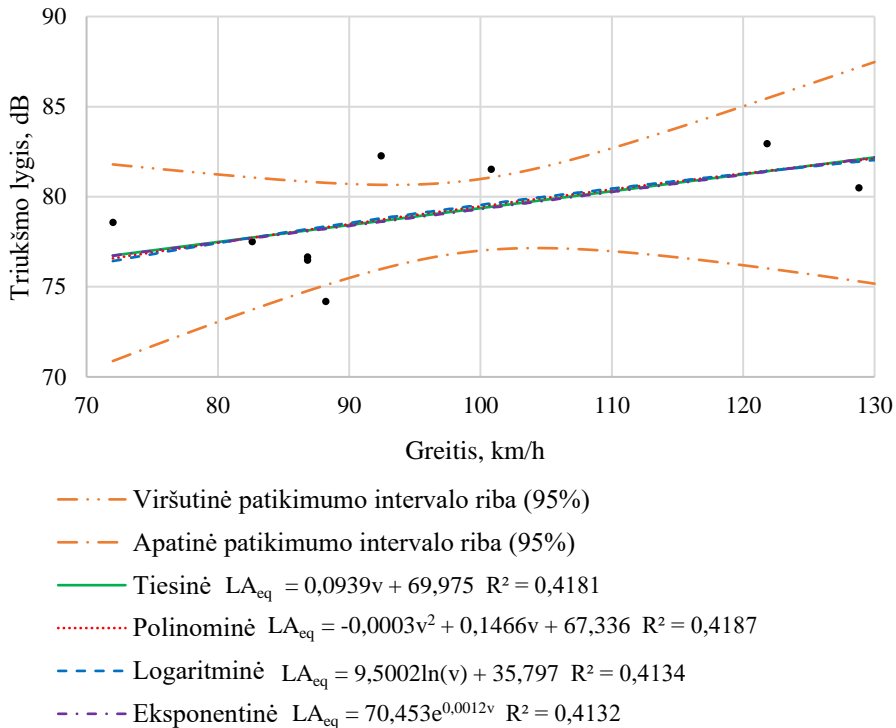
$$CI_i = LAeq(v_i) \pm t_{\alpha,n} SE \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(v_i - \bar{v})^2}{\sum_{i=1}^m (v_i - \bar{v})^2}}, \quad (3.8)$$

čia  $LAeq(v_i)$  – triukšmo lygis, dB esant greičiui  $v_i$ , km/h);  $SE$  – standartinė paklaida;  $n$  – laisvės laipsnis;  $v$  – greitis, km/h;  $\bar{v}$  – vidutinė greičio reikšmė, km/h.

Mažiausias koreliacijos koeficientas ir pasikliautinojo intervalo ribos skaičiuojamos esant 0,05 pasiklovimo lygmeniui, kurio pakanka duomenų koreliacijai nustatyti.

Matavimo metu užregistruota 10 motociklų, važiuojančių sausa asfalto danga. Motociklų skleidžiamo triukšmo lygio vertės pasiskirsto nuo 74 iki 83 dB, esant nuo 72 iki 130 km/h TP greičio ribose (3.11 pav.). Analizuojant motociklų skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybės nuo greičio duomenis, per juos nubrėžus regresijos kreives (jų lygtys ir determinacijos koeficientai pateikti 3.11 pav.), nustatyta, kad geriausiai išmatuotas reikšmes atitinka polinominė

kreivė. Polinominės kreivės determinacijos koeficientas lyginant su kitų yra didžiausias ir yra lygus  $R^2 = 0,4187$ . Šios regresijos kreivės koreliacijos koeficientas lygus  $r = 0,647$ , kuris parodo vidutinį ryšį su užregistruotais duomenimis. Užregistruotam TP skaičiui mažiausias koreliacijos koeficientas yra  $r_{\min} = 0,632$ . Tai reiškia, kad regresijos kreivė koreliuoja su gautais eksperimentiniais rezultatais.

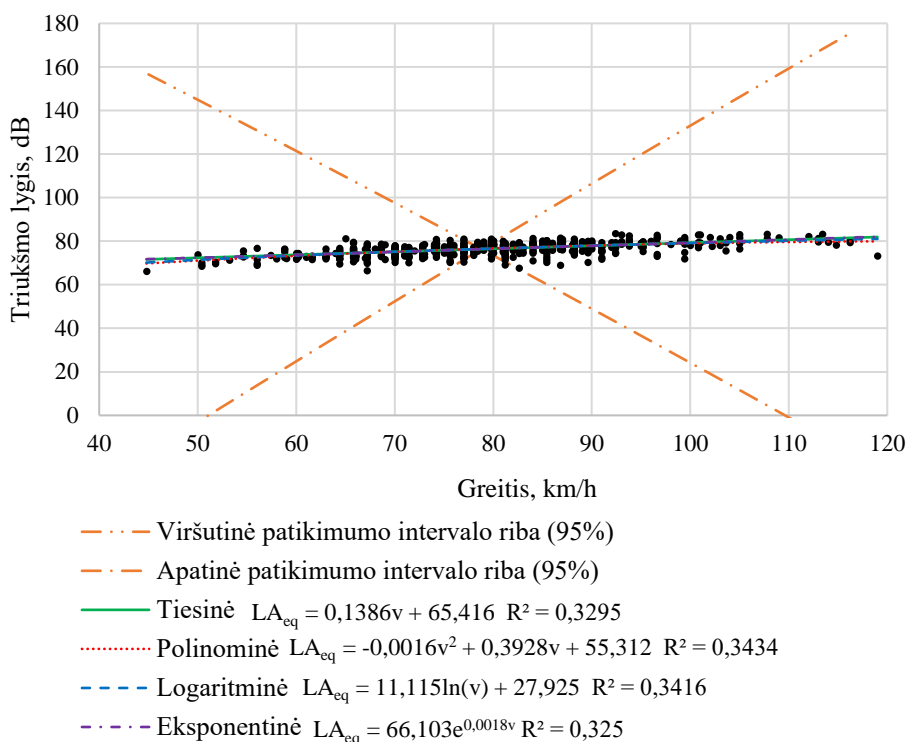


**3.11 pav.** Motociklų skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybė nuo greičio važiuojant sausa asfalto danga

**Fig. 3.11.** Noise level dependence on motorcycle velocity, when driving on dry asphalt

Matavimo metu užregistruota 570 lengvųjų automobilių, važiuojančių sausa asfalto danga. Lengvųjų automobilių skleidžiamo triukšmo lygio vertės pasiskirsto nuo 66 iki 84 dB, esant nuo 45 iki 119 km/h TP greičio ribose (3.12 pav.). Analizuojant lengvųjų automobilių skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybės nuo greičio duomenis, per juos nubrėžus regresijos kreives (jų lygtys ir determinacijos koeficientai pateikti 3.12 pav.), nustatyta, kad geriausiai išmatuotas reikšmes atitinka polinominė kreivė. Polinominės kreivės determinacijos koeficientas

lyginant su kitų yra didžiausias ir yra lygus  $R^2 = 0,3434$ . Šios regresijos kreivės koreliacijos koeficientas lygus  $r = 0,571$ , kuris parodo vidutinį ryšį su užregistruotais duomenimis. Užregistruotam TP skaičiui mažiausias koreliacijos koeficientas yra  $r_{\min} = 0,082$ . Tai reiškia, kad regresijos kreivė koreliuoja su gautais eksperimentiniais rezultatais.

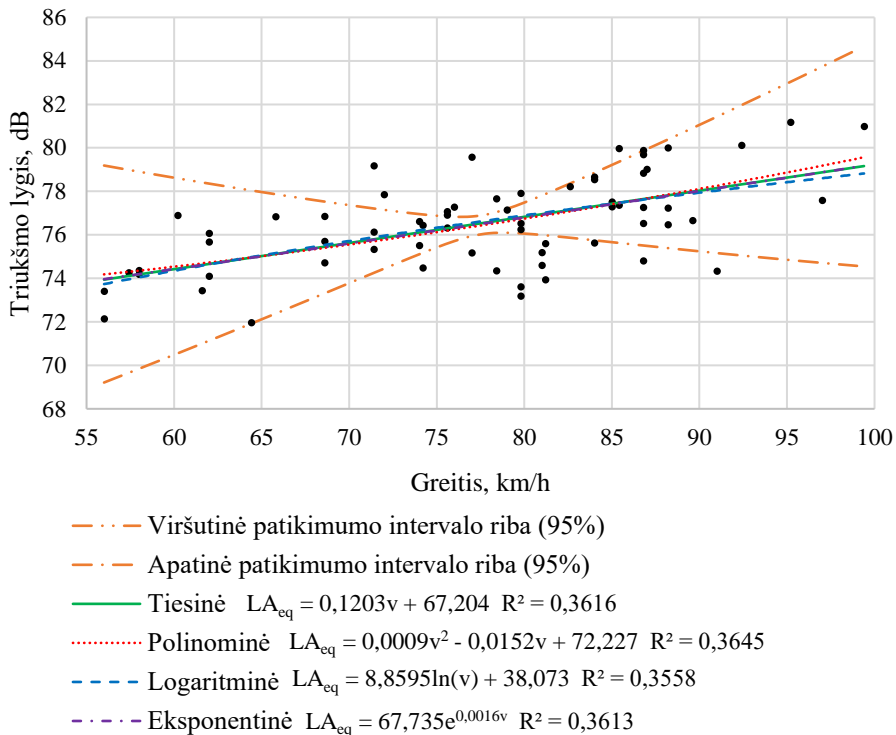


**3.12 pav.** Lengvųjų automobilių skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybė nuo greičio važiuojant sausa asfalto danga

**Fig. 3.12.** Noise level dependence on passenger car velocity, when driving on dry asphalt

Matavimo metu užregistruoti 65 mikroautobusai, važiuojantys sausa asfalto danga. Mikroautobusų skleidžiamo triukšmo lygio vertės pasiskirsto nuo 72 iki 81 dB, esant nuo 56 iki 99 km/h TP greičio ribose (3.13 pav.). Analizuojant mikroautobusų skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybės nuo greičio duomenis, per juos nubrėžus regresijos kreives (jų lygtys ir determinacijos koeficientai pateikti 3.13 pav.), nustatyta, kad geriausiai išmatuotas reikšmes atitinka polinominė kreivė. Polinominės kreivės determinacijos koeficientas lyginant su kitų yra di-

džiausias ir yra lygus  $R^2 = 0,3645$ . Šios regresijos kreivės koreliacijos koeficientas lygus  $r = 0,601$ , kuris parodo vidutinį ryšį su užregistruotais duomenimis. Užregistruotam TP skaičiui mažiausias koreliacijos koeficientas yra  $r_{\min} = 0,244$ . Tai reiškia, kad regresijos kreivė koreliuoja su gautais eksperimentiniais rezultatais.

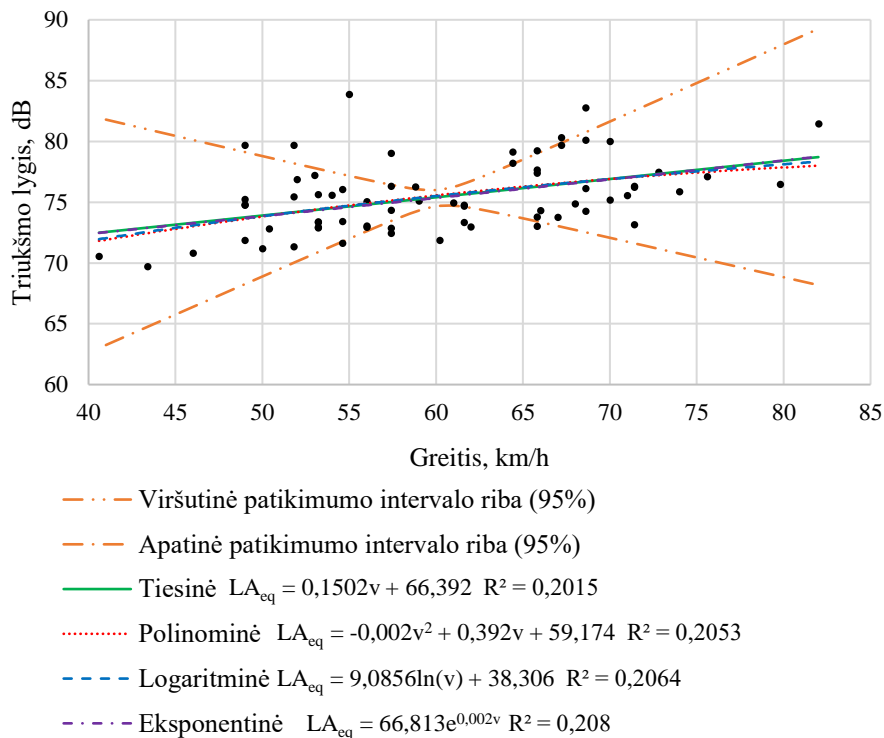


**3.13 pav.** Mikroautobusų skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybė nuo greičio važiuojant sausa asfalto danga

**Fig. 3.13.** Noise level dependence on van velocity, when driving on dry asphalt

Matavimo metu užregistruoti 68 autobusai, važiuojantys sausa asfalto danga. Autobusų skleidžiamo triukšmo lygio vertės pasiskirsto nuo 70 iki 84 dB, esant nuo 41 iki 82 km/h TP greičio ribose (3.14 pav.). Analizuojant autobusų skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybės nuo greičio duomenis, per juos nubrėžus regresijos kreives (jų lygtys ir determinacijos koeficientai pateikti 3.14 pav.), nustatyta, kad geriausiai išmatuotas reikšmes atitinka eksponentinė kreivė. Eksponentinės kreivės determinacijos koeficientas lyginant su kitų yra didžiausias ir yra lygus  $R^2 = 0,208$ . Šios regresijos kreivės koreliacijos koeficientas lygus

$r = 0,449$ , kuris parodo silpną ryšį su užregistruotais duomenimis. Užregistruotam TP skaičiui mažiausias koreliacijos koeficientas yra  $r_{\min} = 0,239$ . Tai reiškia, kad regresijos kreivė koreliuoja su gautais eksperimentiniais rezultatais.

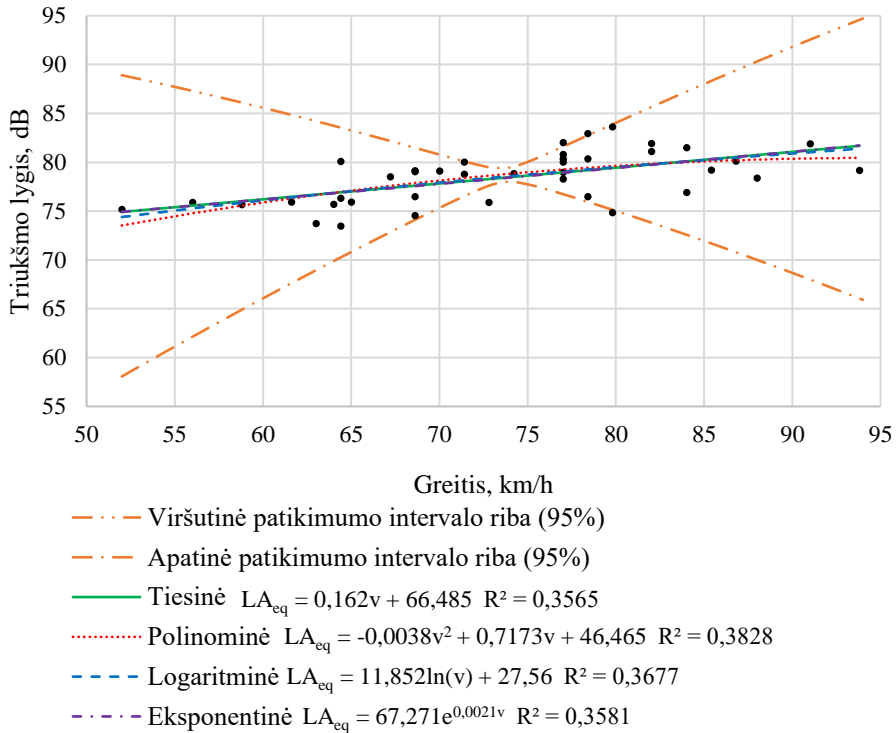


**3.14 pav.** Autobusų skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybė nuo greičio važiuojant sausa asfalto danga

**Fig. 3.14.** Noise level dependence on bus velocity, when driving on dry asphalt

Matavimo metu užregistruota 40 mažų sunkvežimių, važiuojančių sausa asfalto danga. Mažų sunkvežimių skleidžiamo triukšmo lygio vertės pasiskirsto nuo 73 iki 84 dB, esant nuo 52 iki 94 km/h TP greičio ribose (3.15 pav.). Analizuojant mažų sunkvežimių skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybės nuo greičio duomenis, per juos nubrėžus regresijos kreives (jų lygtys ir determinacijos koeficientai pateikti 3.15 pav.), nustatyta, kad geriausiai išmatuotas reikšmes atitinka polinominė kreivė. Polinominės kreivės determinacijos koeficientas lyginant su kitų yra didžiausias ir yra lygus  $R^2 = 0,3828$ . Šios regresijos kreivės koreliacijos koeficientas lygus  $r = 0,597$ , kuris parodo vidutinį ryšį su užregistruotais duomenimis. Užregistruotam TP skaičiui mažiausias koreliacijos koeficientas yra

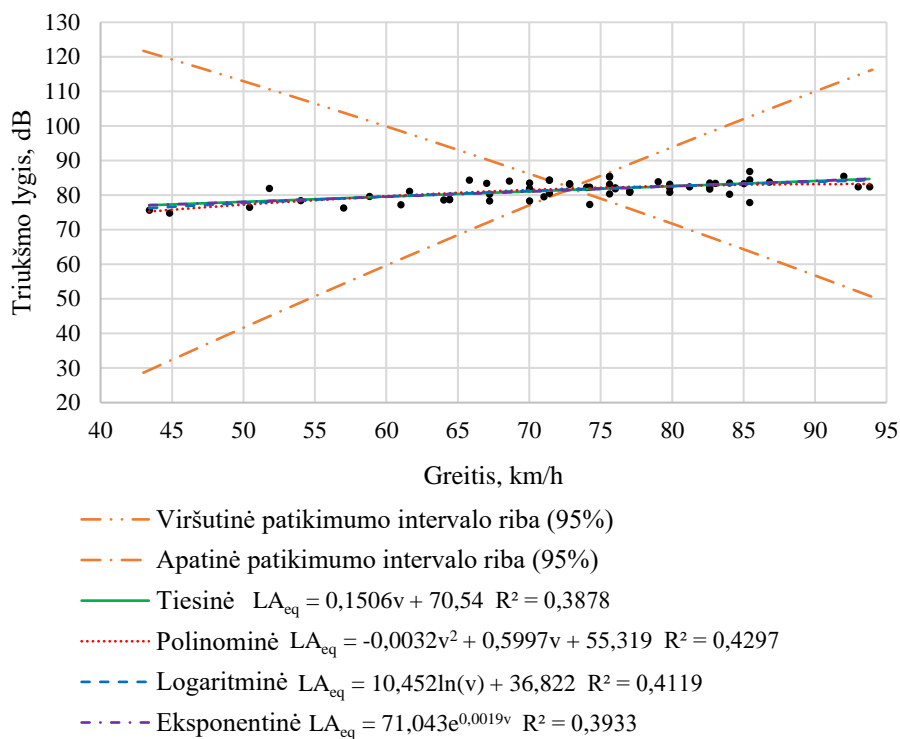
$r_{\min} = 0,312$ . Tai reiškia, kad regresijos kreivė koreliuoja su gautais eksperimentiniais rezultatais.



**3.15 pav.** Mažų sunkvežimių skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybė nuo greičio važiuojant sausa asfalto danga

**Fig. 3.15.** Noise level dependence on light trucks velocity, when driving on dry asphalt

Matavimo metu užregistruota 60 didelių sunkvežimių, važiuojančių sausa asfalto danga. Didelių sunkvežimių skleidžiamo triukšmo lygio vertės pasiskirsto nuo 75 iki 87 dB, esant nuo 43 iki 94 km/h TP greičio ribose (3.16 pav.). Analizuojant didelių sunkvežimių skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybės nuo greičio duomenis, per juos nubrėžus regresijos kreives (jų lygtys ir determinacijos koeficientai pateikti 3.16 pav.), nustatyta, kad geriausiai išmatuotas reikšmes atitinka polinominė kreivė. Polinominės kreivės determinacijos koeficientas lyginant su kitų yra didžiausias ir yra lygus  $R^2 = 0,4297$ . Šios regresijos kreivės koreliacijos koeficientas lygus  $r = 0,623$ , kuris parodo vidutinį ryšį su užregistruotais duomenimis. Užregistruotam TP skaičiui mažiausias koreliacijos koeficientas yra  $r_{\min} = 0,254$ . Tai reiškia, kad regresijos kreivė koreliuoja su gautais eksperimentiniais rezultatais.



**3.16 pav.** Didelių sunkvežimių skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybė nuo greičio važiuojant sausa asfalto danga

**Fig. 3.16.** Noise level dependence on heavy trucks velocity, when driving on dry asphalt

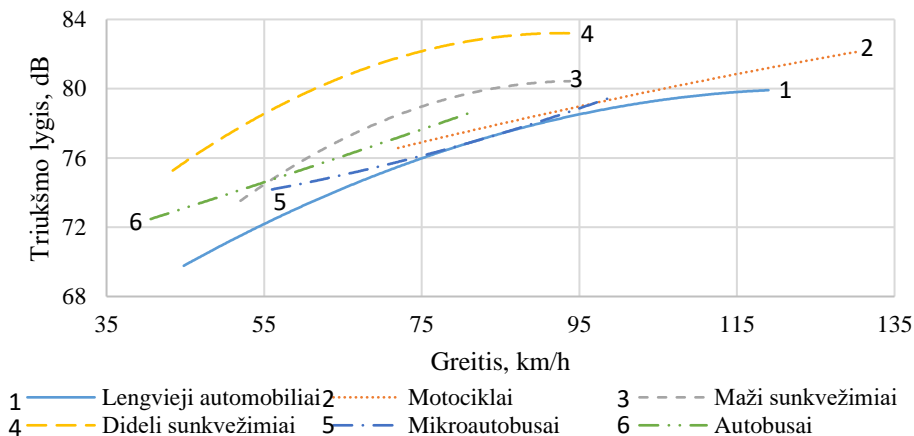
Apibendrinant atskirų TP kategorijų skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybę nuo greičio, važiuojant sausa asfalto danga, nubrėžtos geriausiai atitikusios kreivės (3.17 pav.) ir atlikta jų lyginamoji analizė.

Lyginant su lengvaisiais automobiliais, kurių vidutinis skleidžiamas TL 71 dB, važiuojant 50 km/h greičiu, kitos TP vidutiniškai triukšmingesnės: motociklai – 3 dB (4,2 %), mikroautobusai – 4,3 dB (6 %), autobusai – 2,9 dB (4,1 %), maži sunkvežimiai – 1,9 dB (2,6 %), dideli sunkvežimiai – 6,4 dB (9 %). Procentinės skirtumo išraiškos gautos apskaičiavus pagal (2.6) formulę.

Važiuojant 70 km/h greičiu, kai lengvųjų automobilių 75 dB, kitos TP vidutiniškai triukšmingesnės: motociklai – 1,2 dB (1,5 %), mikroautobusai – 2,7 dB (3,6 %), autobusai – 1,9 dB (2,5 %), maži sunkvežimiai – 3,1 dB (4,1 %), dideli sunkvežimiai – 6,7 dB (8,9 %).

Važiuojant 90 km/h greičiu, kitos TP vidutiniškai triukšmingesnės, kai lengvųjų automobilių 77,7 dB: motociklai – 0,4 dB (0,5 %), mikroautobusai – 3,2 dB

(4,1 %), autobusai – 2,3 dB (2,9 %), maži sunkvežimiai – 2,5 dB (3,3 %), dideli sunkvežimiai – 5,7 dB (7,3 %).



**3.17 pav.** Apibendrintos atskirų transporto priemonių kategorijų skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybės nuo greičio važiuojant sausa asfalto danga

**Fig. 3.17.** Generalized noise level dependence on velocity for different vehicle categories, when driving on dry asphalt

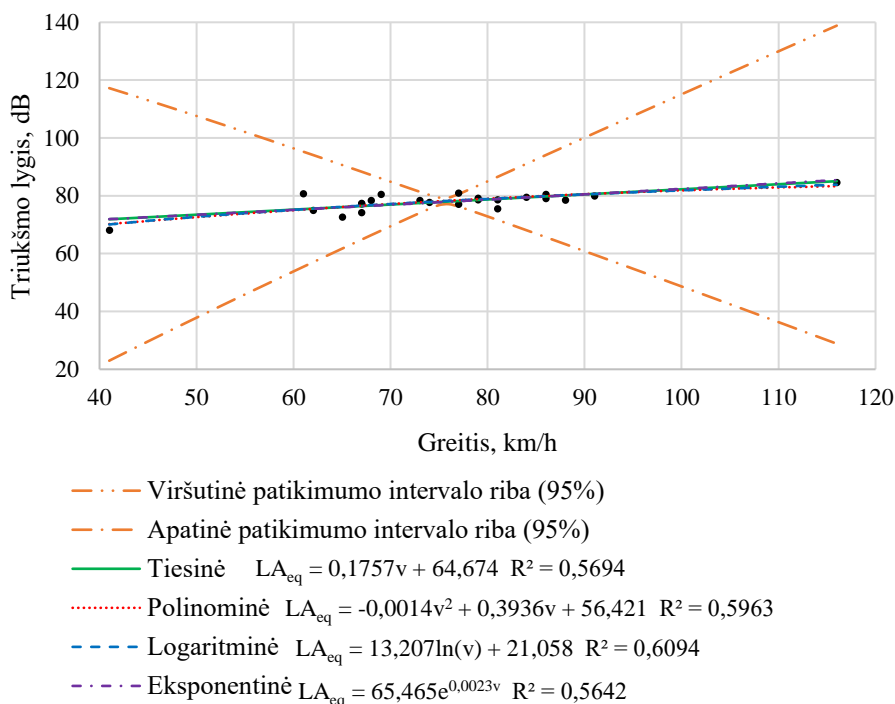
Lengvųjų automobilių skleidžiamo TL priklausomybei nuo jų greičio nustatyti, buvo atlikti tyrimai ir esant kitoms kelio dangos būklėms. Eksperimentiniai tyrimai, be sausos asfalto dangos, buvo atliekami esant: šlapiai, padengtai sausu sniegu ir padengtai sausu sniegu su sniego provėžomis asfalto dangai. Šie lengvųjų automobilių skleidžiamo TL priklausomybės nuo jų greičio eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti toje pačioje vietoje ir esant tam pačiam matavimo prietaisų išdėstymui, kaip ir matuojant esant sausai asfalto dangai.

Skirtingoms kelio dangos būklėms atlikti eksperimentiniai tyrimai leidžia pritaikyti MTLTM su galimybe apskaičiuoti TL palijus ar pasnigus. Kad šiuos duomenis būtų galima susieti su patobulinto DTSTM gautais greičio rezultatais, nustatomos tinkamiausios atskiroms TP kategorijoms regresijos kreivės ir jų lygtys.

Matavimo metu užregistruoti 24 lengvieji automobiliai, važiuojantys šlapia asfalto danga. Lengvųjų automobilių skleidžiamo triukšmo lygio vertės pasiskirsto nuo 68 iki 85 dB, esant nuo 41 iki 130 km/h TP greičio ribose (3.18 pav.). Analizuojant lengvųjų automobilių skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybės nuo greičio duomenis, per juos nubrėžus regresijos kreives (jų lygtys ir determinacijos koeficientai pateikti 3.18 pav.), nustatyta, kad geriausiai išmatuotas reikšmes atitinka logaritminė kreivė. Logaritminės kreivės determinacijos koeficientas lyginant su kitų yra didžiausias ir yra lygus  $R^2 = 0,6094$ . Šios regresijos kreivės



koreliacijos koeficientas lygus  $r = 0,755$ , kuris parodo stiprų ryšį su užregistruotais duomenimis. Užregistruotam TP skaičiui mažiausias koreliacijos koeficientas yra  $r_{\min} = 0,413$ . Tai reiškia, kad regresijos kreivė koreliuoja su gautais eksperimentiniais rezultatais.

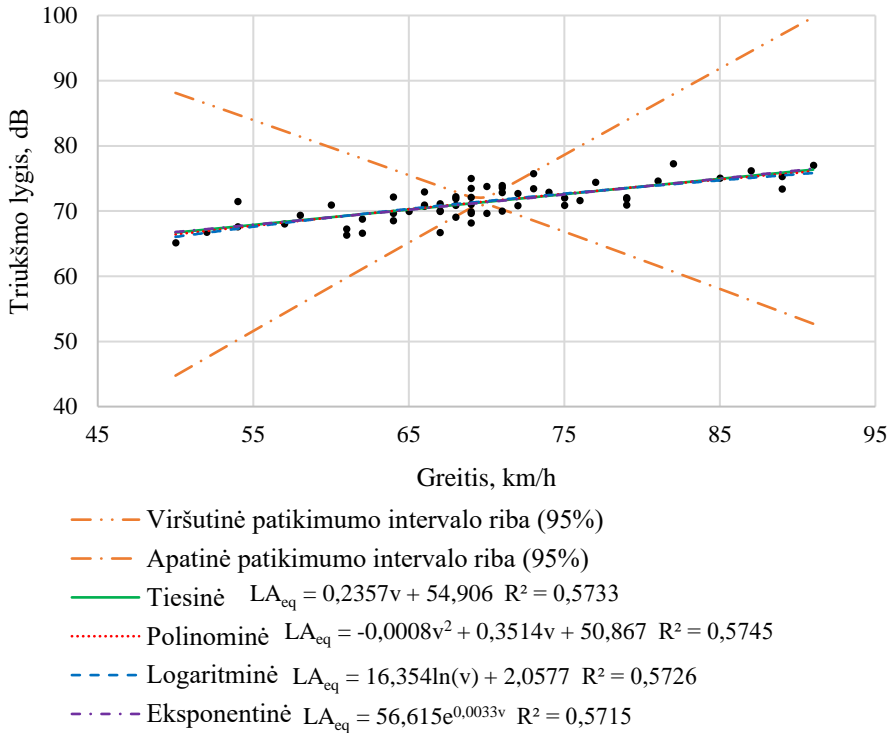


**3.18 pav.** Lengvųjų automobilių skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybė nuo greičio važiuojant šlapia asfalto danga

**Fig. 3.18.** Noise level dependence on passenger car velocity, when driving on wet asphalt

Matavimo metu užregistruoti 58 lengvieji automobiliai, važiuojantys sausu sniegu padengta asfalto danga. Lengvųjų automobilių skleidžiamo triukšmo lygio vertės pasiskirsto nuo 65 iki 77 dB, esant nuo 50 iki 91 km/h TP greičio ribose (3.19 pav.). Analizuojant lengvųjų automobilių skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybės nuo greičio duomenis, per juos nubrėžus regresijos kreives (jų lygtys ir determinacijos koeficientai pateikti 3.19 pav.), nustatyta, kad geriausiai išmatuotas reikšmes atitinka polinominė kreivė. Polinominės kreivės determinacijos koeficientas lyginant su kitų yra didžiausias ir yra lygus  $R^2 = 0,5745$ . Šios regresijos kreivės koreliacijos koeficientas lygus  $r = 0,757$ , kuris parodo stiprų ryšį su

užregistruotais duomenimis. Užregistruotam TP skaičiui mažiausias koreliacijos koeficientas yra  $r_{\min} = 0,259$ . Tai reiškia, kad regresijos kreivė koreliuoja su gautais eksperimentiniais rezultatais.

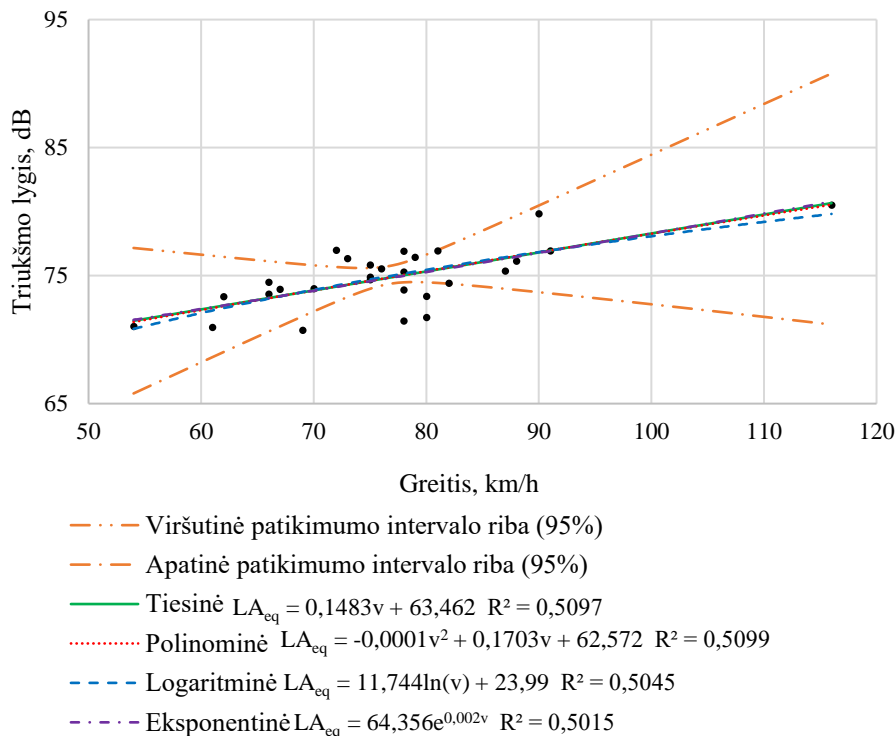


**3.19 pav.** Lengvųjų automobilių skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybė nuo greičio važiuojant sausu sniegu padengta asfalto danga

**Fig. 3.19.** Noise level dependence on passenger car velocity, when driving on dry snow-covered asphalt

Matavimo metu užregistruoti 28 lengvieji automobiliai, važiuojantys sausu sniegu su sniegu provėžomis padengta asfalto danga. Lengvųjų automobilių skleidžiamo triukšmo lygio vertės pasiskirsto nuo 71 iki 81 dB, esant nuo 54 iki 116 km/h TP greičio ribose (3.20 pav.). Analizuojant lengvųjų automobilių skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybės nuo greičio duomenis, per juos nubrėžus regresijos kreives (jų lygtys ir determinacijos koeficientai pateikti 3.20 pav.), nustatyta, kad geriausiai išmatuotas reikšmes atitinka polinominė kreivė. Polinominės kreivės determinacijos koeficientas lyginant su kitų yra didžiausias ir yra lygus  $R^2 = 0,5099$ . Šios regresijos kreivės koreliacijos koeficientas lygus

$r = 0,714$ , kuris parodo vidutinį ryšį su užregistruotais duomenimis. Užregistruotam TP skaičiui mažiausias koreliacijos koeficientas yra  $r_{\min} = 0,374$ . Tai reiškia, kad regresijos kreivė koreliuoja su gautais eksperimentiniais rezultatais.



**3.20 pav.** Lengvųjų automobilių skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybė nuo greičio važiuojant sausu sniegu su sniego provėžomis padengta asfalto danga

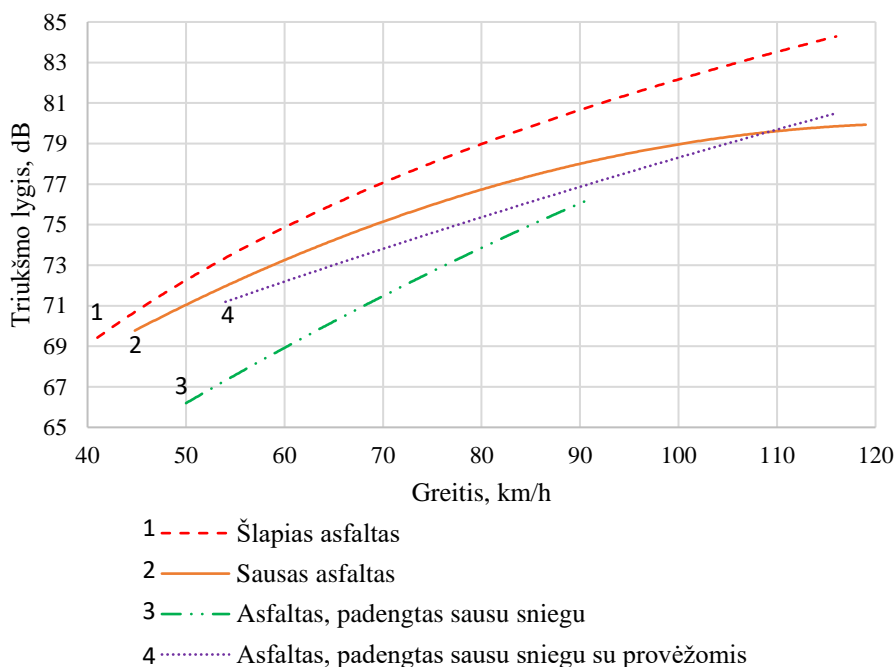
**Fig. 3.20.** Noise level dependence on passenger car velocity, while driving, covered with dry snow with snow ruts, asphalt

Apibendrinant lengvųjų automobilių skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybę nuo greičio, važiuojant sausa, šlapia, padengta sniegu ir padengta sniegu su sniego provėžomis asfalto danga, nubrėžtos geriausiai atitikusios kreivės (3.21 pav.) ir atlikta jų lyginamoji analizė.

Lyginant lengvųjų automobilių, kurių vidutinis skleidžiamas TL 71 dB, važiuojant sausa asfalto danga 50 km/h greičiu ir važiuojant šlapia asfalto danga vidutiniškai 1,8 dB (2,5 %) skleidžiamas TL didesnis, važiuojant sausu sniegu padengta asfalto danga – 4,5 dB (6,8 %) mažesnis ir važiuojant sausu sniegu su sniego provėžomis padengta asfalto danga – 0,1 dB (0,2 %) mažesnis.

Važiuojant sausa asfalto danga 70 km/h greičiu, lengvųjų automobilių vidutinis skleidžiamas TL 75 dB, o važiuojant šlapia kelio danga, vidutiniškai 2,2 dB (2,9 %) skleidžiamas TL didesnis, važiuojant sausu sniegu padengta asfalto danga – 3,4 dB (4,8 %) mažesnis ir važiuojant sausu sniegu su sniego provėžomis padengta asfalto danga – 1 dB (1,3 %) mažesnis.

Važiuojant sausa asfalto danga 90 km/h greičiu, lengvųjų automobilių vidutinis skleidžiamas TL 77 dB, o važiuojant šlapia kelio danga, vidutiniškai 2,8 dB (3,6 %) skleidžiamas TL didesnis, važiuojant sausu sniegu padengta asfalto danga – 1,7 dB (2,2 %) mažesnis ir važiuojant sausu sniegu su sniego provėžomis padengta asfalto danga – 0,6 dB (0,8 %) mažesnis.



**3.21 pav.** Apibendrintos lengvųjų automobilių skleidžiamo triukšmo lygio priklausomybės nuo greičio, važiuojant skirtingos būklės asfalto danga  
**Fig. 3.21.** Generalized noise level dependence on passenger car velocity in a different state of asphalt pavement

Lyginant lengvųjų automobilių, kurių vidutinis skleidžiamas TL 71 dB, važiuojant sausa asfalto danga 50 km/h greičiu ir važiuojant šlapia asfalto danga vidutiniškai 1,8 dB (2,5 %) skleidžiamas TL didesnis, važiuojant sausu sniegu padengta asfalto danga – 4,5 dB (6,8 %) mažesnis ir važiuojant sausu sniegu su sniego provėžomis padengta asfalto danga – 0,1 dB (0,2 %) mažesnis.

Važiuojant sausa asfalto danga 70 km/h greičiu, lengvųjų automobilių vidutinis skleidžiamas TL 75 dB, o važiuojant šlapia kelio danga, vidutiniškai 2,2 dB (2,9 %) skleidžiamas TL didesnis, važiuojant sausu sniegu padengta asfalto danga – 3,4 dB (4,8 %) mažesnis ir važiuojant sausu sniegu su sniego provėžomis padengta asfalto danga – 1 dB (1,3 %) mažesnis.

Važiuojant sausa asfalto danga 90 km/h greičiu, lengvųjų automobilių vidutinis skleidžiamas TL 77 dB, o važiuojant šlapia kelio danga, vidutiniškai 2,8 dB (3,6 %) skleidžiamas TL didesnis, važiuojant sausu sniegu padengta asfalto danga – 1,7 dB (2,2 %) mažesnis ir važiuojant sausu sniegu su sniego provėžomis padengta asfalto danga – 0,6 dB (0,8 %) mažesnis.

Padangos ir kelio dangos sąveikos sukeliama triukšmui matuoti naudota Brno transporto tyrimo centro (Čekija) matavimo sistema CPX, grįsta triukšmo matavimo artumo metodu. Matavimai buvo atliekami pagal ISO 11819-2 (2017) standarto nurodymus, važiuojant 50 km/h greičiu sausomis kelio dangomis. Kelio dangos, kuriomis važiuojant buvo atliekami matavimai, buvo šios: labai plonų sluoksnių asfaltbetonis, turintis iki 8 mm skaldos savo sudėtyje (BBTM 8), mikrotekstūruota cemento danga, tempiant burlapą, turinti iki 11 mm skaldos (CBK 11), asfaltbetonis, turintis iki 11 mm (AC 11), porėtasis asfaltas, turintis iki 8 mm skaldos (PA 8), skaldos ir mastikos asfalto mišinys turintis iki 11 mm skaldą (SMA 11) ir Specialios technologijos „FrostGrip“ asfaltas, turintis iki 11 mm mėlynųjų akmenų skaldos (FrostGrip 11).

Padangos ir kelio dangos sąlyčio sukeliama triukšmo CPX metodu nustatytos vidutinės TL reikšmės pateiktos 3.5 lentelės trečiame stulpelyje. Eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami važiuojant sausomis, skirtingo tipo asfalto ir betono dangomis 50 km/h greičiu. Kadangi žinoma, kad atliekant CPX metodu mikrofonai nuo rato sumontuoti 0,2 m atstumu. O atliekami TL tyrimai SPB metodu 7,5 m atstumu nuo TP. Tada pagal (2.19) lygtį galima apskaičiuoti, kokia TP skleidžiamo TL dalis dėl padangos ir kelio dangos sąlyčio girdima 7,5 m atstumu. Šie perskaičiuoti rezultatai pateikti 3.5 lentelės ketvirtame stulpelyje. Penktame stulpelyje pateikti TL pataisos koeficientai, kurie gauti vertinant vidutinių TL verčių skirtumą asfaltbetonio AC 11 dangos atžvilgiu. Kadangi SPB metodu eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti šalia kelio, kurio danga AC 11. Pavyzdžiui, PA 8 kelio dangos ir padangos sąveikos metu skleidžiamas TL yra 90 dB, o AC 11 – 90,5 dB. Gaunama, kad padangos sąveikos su PA 8 danga metu girdimas 0,5 dB didesnis TL nei su AC 11. Arba, jeigu BBTM 8 kelio dangos ir padangos sąveikos metu skleidžiamas TL yra 88,5 dB, tada girdimas 2 dB mažesnis TL, lyginant su AC 11. Šie TL pataisos koeficientai naudojami atliekant TL gatvės su kitokia danga nei AC 11 skaičiavimus. Naudojant MTLTM, prie atskirų TP skleidžiamo TL pridedamas pataisos koeficientas SPB metodu gautiems rezultatams pritaikyti.

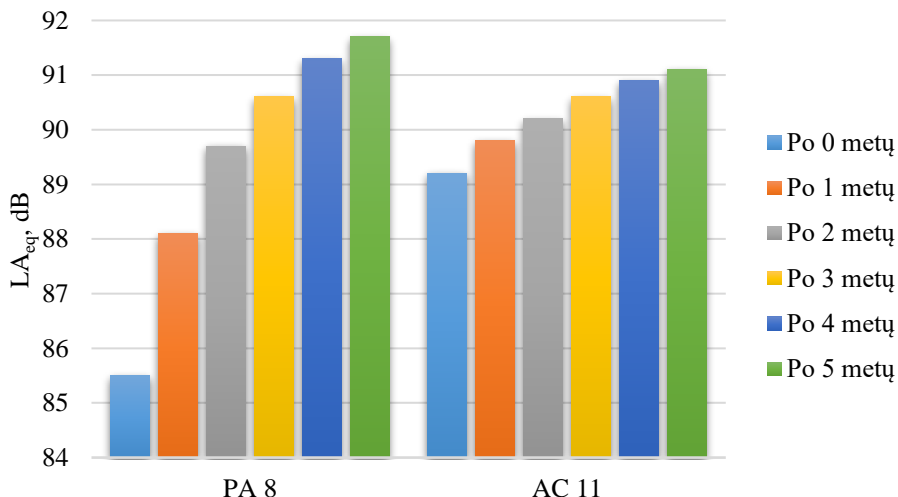
**3.5 lentelė.** CPX metodu nustatytos vidutinės triukšmo lygio reikšmės sauso kelio paviršiaus ir padangos sąveikos metu važiuojant 50 km/h greičiu

**Table 3.5.** CPX average noise values between the dry road surface and tyre interaction at 50 km/h

Asfalto ar betono žymėjimas	Kelio dangos (asfalto, betono) tipas	Triukšmo lygis (CPX), dB	Triukšmo lygis (SPB), dB	Triukšmo lygio pataisos koeficientas, dB
<i>FrostGrip 11</i>	Specialios technologijos „FrostGrip“ asfaltas, turintis iki 11 mm mėlynųjų akmenų skaldos.	92,4	60,9	+1,9
SMA 11	Skaldos ir mastikos asfalto mišinys, turintis iki 11 mm skaldos.	91,6	60,1	+1,1
PA 8	Porėtasis asfaltas, turintis iki 8 mm skaldą.	91,0	59,5	+0,5
AC 11	Asfaltbetonis, turintis iki 11 mm skaldos.	90,5	59,0	0
CBK 11	Mikrotekstūruota cemento danga, turinti iki 11 mm skaldos.	89,7	58,2	−0,8
BBTM 8	Labai plonų sluoksnių asfaltbetonis, turintis iki 8 mm skaldos.	88,5	57,0	−2,0

Rezultatai rodo, kad važiuojant 50 km/h greičiu, padangos sąveikos triukšmo lygio vidutinės reikšmės vidutiniškai skiriasi 3,9 dB pagal tai, kokia asfalto danga TP važiuoja.

Padangos ir kelio dangos sąveikos sukeliama triukšmui CPX metodu tirti matavimų metu gauti rezultatai rodo, kad porėtasis asfaltas, turintis iki 8 mm skaldos savo sudėtyje (PA 8), yra triukšmingesnis nei asfaltbetonis, turintis iki 11 mm skaldos savo sudėtyje (AC 11). Porėtasis asfaltas laikomas tyliuoju asfaltu. Jis toks ir yra, jeigu danga yra nauja ir tinkamai prižiūrima (Krivaneck *et al.* 2017). Bet porėtojo asfalto tuštymės laikui bėgant prisipildo nešvarumais ir praranda savybę slopinti triukšmo lygį, atsirandantį dėl rato ir kelio dangos tekstūros sąveikos. Tokia asfalto danga maždaug po 2–3 metų netgi tampa triukšmingesnė, lyginant su to paties amžiaus AC 11 danga. Tai įrodantis tyrimas atliktas autorių Krivaneck *et al.* (2017) parengtoje metodikoje ir rezultatai pateikti 3.22 paveiksle.



**3.22 pav.** Įprastinio triukšmingumo (ACO) ir mažo triukšmingumo (PA) asfalto mišinių palyginimas kintant jų amžiui (Krivanek *et al.* 2017)

**Fig. 3.22.** Comparison of conventional noise (ACO) and low noise (PA) asphalt mixtures with varying age (Krivanek *et al.* 2017)

Pagal sukurtą MTLTM reikia įvertinti, kokia yra modeliujamos gatvės kelio danga, atitinkamai pridendant ar atimant nuo atskiros TP skleidžiamo TL vertės, gautos pagal SPB metodą. Šiuo metodu TL priklausomybės nuo greičio eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami šalia kelio, kurio yra asfaltbetonio AC 11 kelio danga.

### 3.5. Trečiojo skyriaus išvados

1. Vairuotojų reakcijos laikas kol pajuda jų vairuojamos TP, kai užsidega žalias šviesoforo signalas ar pajuda priekyje esanti TP, yra nuo 0 iki 4,5 s, bet dažniausiai būna nuo 0,5 iki 1,5 s.
2. Eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad intensyviai sningant, pablogėjus matomumui ir pakitus kelio dangos būklei, TP vidutinis greitis sumažėja apie 10 %.
3. Sausa asfalto danga 70 km/h važiuojančio lengvojo automobilio skleidžiamas TL, išmatuotas keliu važiuojančios transporto priemonės skleidžiamo triukšmo matavimo statistiniu metodu (SPB), buvo 75 dB, o jam važiuojant ta pačia, bet šlapia danga, TL padidėjo 2,2 dB (2,9 %). Važiuojant suspaustu sausu sniegu padengta asfalto danga lengvojo automobilio

TL sumažėjo 3,4 dB (4,8 %), o jam važiuojant sausu sniegu su provėžomis padengta danga, TL sumažėjo 1,0 dB (1,3 %).

4. SPB metodu nustatyta, kad važiuojant 70 km/h greičiu, kai lengvųjų automobilių buvo 75 dB, kitos TP vidutiniškai buvo triukšmingesnės: motociklai – 1,2 dB (1,5 %), mikroautobusai – 2,7 dB (3,6 %), autobusai – 1,9 dB (2,5 %), maži sunkvežimiai – 3,1 dB (4,1 %), dideli sunkvežimiai – 6,7 dB (8,9 %). Šie eksperimentiniai duomenys rodo, kad srauto sudėtis turi didelės įtakos bendrajam triukšmo lygiui miesto gatvėje.
5. Didelio artumo triukšmo matavimo metodu (CPX), važiuojant 50 km/h greičiu, nustatytos skirtingų kelio dangų ir padangos sąveikos triukšmo lygio vidutinės reikšmės, kurios 3,9 dB skiriasi nuo *FrostGrip* ir BBTM 8 asfalto tipų.



---



## Transporto srauto parametrų įtakos momentiniam triukšmo lygiui teorinio modeliavimo rezultatų analizė

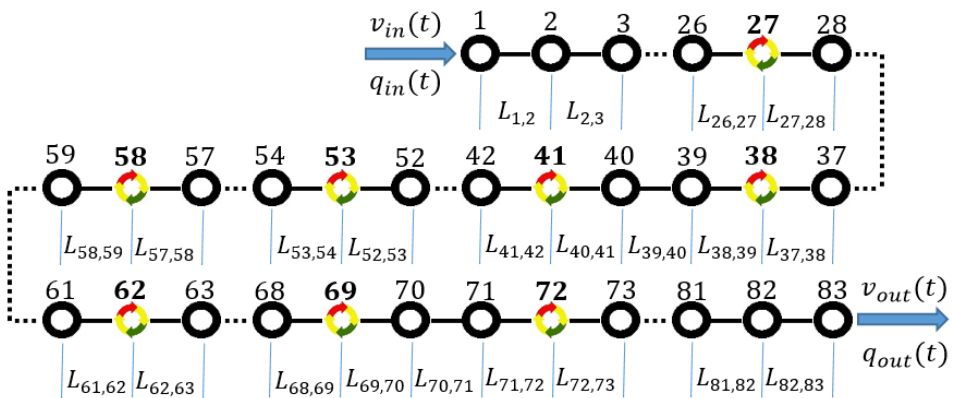
Šiame skyriuje, pritaikant patobulintą DTSTM, tiriamas šviesoforų signalų persijungimo periodo, kintančių kraštinių sąlygų ir eismo įvykių pašalinimo trukmės įtaka TS dinaminiam procesams. Taikant patobulintą DTSTM ir sukurta MTLTM, nustatomas transporto srauto skleidžiamas MTL ir pateikti rezultatai.



Skyriaus tematika paskelbtos penkios autoriaus publikacijos kartu su bendra-autoriais (Danilevičius, Bogdevičius 2017<sup>a</sup>; Danilevičius, Bogdevičius 2017<sup>b</sup>; Danilevičius, Bogdevičius 2018; Danilevičius *et al.* 2018; Danilevičius, Bogdevičius 2020).



## 4.1. Modeliuojamo transporto srauto dinaminių procesų tyrimai

Miesto gatvių TS valdomi reguliuojant šviesoforų signalus, keičiant įjungtų šviesoforo sekcijų trukmę. Vilniaus miesto SĮ „Susisiekimo paslaugos“ interneto svetainėje skelbiamame TS žemėlapyje Kalvarijų gatvė pateikiama kaip viena iš labiausiai apkrautų Vilniaus miesto gatvių. Todėl buvo pasirinktas šios gatvės ruožas miesto centro kryptimi judančiam TS modeliuoti.

Pagal antrajame skyriuje pateiktą principinę schemą TS modeliui sudaryti (2.1 pav.) buvo sudaryta vienos krypties gatvės ruožo skaičiavimo schema (4.1 pav.). Tam tikslui visa modeliuojama gatvė buvo padalyta į vienodo ilgio 50 metrų gatvės elementus ir schemoje pažymėtos reguliuojamosios šviesoforais sankryžos (4.1 pav.). Modeliuojama viena kryptimi judančiam eismui miesto centro link. Skaičiuojamoje schemoje pažymimi gatvės mazgai, kuriuose yra reguliuojamos šviesoforais sankryžos (nurodo simbolis ) , ir gatvės mazgai, kuriuose nėra šviesoforų (nurodo simbolis ) .



**4.1 pav.** Vienos krypties gatvės ruožo skaičiavimo schema:  – gatvės mazgas be šviesoforo;  – gatvės mazgas su šviesoforu

**Fig. 4.1.** One-way street section calculation scheme:  – street node without traffic light;  – street node with traffic light

Kad gaunami TS dinaminių procesų rezultatai greičiau pereitų prie nusistovėjusio transporto priemonių eismo, kuris pasireiškia periodiniu transporto srauto dinaminių parametrų kitimu laike be reikšmingų skirtumų, priskiriamos pradinės TP koncentracijos ir TS greičio reikšmės visiems gatvės mazgams. Pradinė TP koncentracijos reikšmė visuose modeliuojamos gatvės mazguose yra  $k_i = 0,1$  aut./m, TS greitis  $v_i = 10$  m/s, patobulintame DTSTM diferencialinių lygčių integravimo laiko žingsnis 0,01 s. Šiame skyriuje pateikiami TS dinaminių

procesų rezultatai, modeliuojant su skirtingais šviesoforų signalų perjungimo periodais. Taip pat modeliavimo rezultatai skirtingomis kraštinėmis sąlygomis pirmame ir paskutiniame modeliuojamos gatvės mazguose. Modeliuojama eismo įvykių pašalinimo trukmės įtaka. Pasirenkamos individualios kraštinės sąlygos pirmame modeliuojamos gatvės mazge įeinančiam TS ir paskutiniame mazge išėinančiam TS. Panaudojant TS modeliavimo dinaminį procesų gautus rezultatus ir sukurtą MTLTM, nustatytas TS skleidžiamas MTL.

Tiriant TS dinaminį procesus, laikomasi antrajame skyriuje priimtų prielaidų.

## 4.2. Šviesoforų signalų trukmės įtaka transporto srauto dinaminiam procesams ir momentiniam triukšmo lygiui

Šio tyrimo tikslas – pritaikant patobulintą DTSTM, ištirti šviesoforų signalų persijungimo periodo įtaką TS dinaminiam procesams.

TS modeliavimas atliekamas skirtingais šviesoforų periodais, pradedant nuo 98 s iki 248 s. Visas šviesoforo periodas susideda iš pusės laiko raudonos šviesos ir pusės laiko žalios šviesos su geltonos šviesos signalais. Pavyzdžiui, 108 s nustatoma, kad geltona šviesa trunka 2 s, žalia šviesa – 50 s, o raudona šviesa – 54 s (2.5 pav.).

Rezultatams gauti modeliuojamas gatvės ruožas su pasirinktomis TS eismo intensyvumo ir TP koncentracijos reikšmėmis:  $q_{in_0} = 0,5$  aut./s modeliuojamos gatvės pirmame mazge ir  $k_{out} = 0,1$  aut./m paskutiniame mazge.

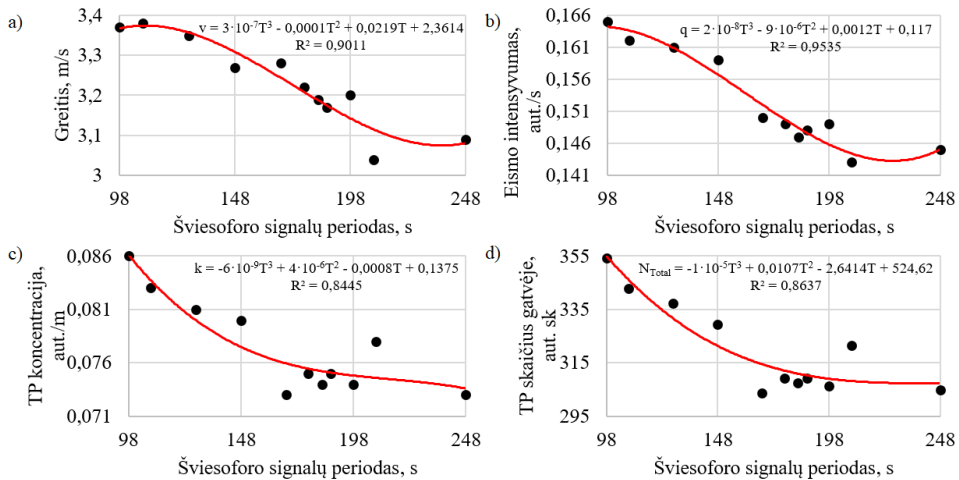
Siekiant nustatyti racionalų šviesoforų signalų perjungimo periodą, TS dinaminį procesų modeliavimas atliktas 11 skirtingų periodų. Nustatytos TS vidutinės reikšmės, atmetus pirmąsias 250 s. Kadangi TS modeliuojamoje gatvėje pirmojo šviesoforo periodo metu dar nespėja pasiskirstyti, todėl iš rezultatų matomi neįprasti parametrų šuoliai ir kritimai (4.4 pav.). Siekiant rezultatų tikslumo, vidutinės reikšmės skaičiuojamos nusistovėjusiu režimu.

Modeliavimo rezultatai pateikti 4.1 lentelėje. Joje pateikta šviesoforo signalų jungimo periodai. Atitinkamai, pagal gautus rezultatus modeliuojant skirtingais šviesoforų jungimo periodais, gautos viso gatvės ruožo TS greičio, eismo intensyvumo, TP koncentracijos ir bendro TP skaičiaus gatvėje vidutinės reikšmės.

**4.1 lentelė.** Transporto srauto parametrų vidutinės reikšmės, kai  $q_{in0} = 0,5$  aut./s,  $k_{out} = 0,1$  aut./m  
**Table 4.1.** Average values of traffic flow parameters when  $q_{in0} = 0.5$  veh./s,  $k_{out} = 0.1$  veh./m

Periodas, s	TS greitis, m/s	TS eismo intensyvumas, aut./s	TP koncentracija, aut./m	Bendras TP skaičius gatvės ruože, aut.
98	3,37	0,165	0,086	354,4
108	3,38	0,162	0,083	342,9
128	3,35	0,161	0,081	337,2
148	3,27	0,159	0,080	329,4
168	3,28	0,150	0,073	303,7
178	3,22	0,149	0,075	309,3
184	3,19	0,147	0,074	307,5
188	3,17	0,148	0,075	309,2
198	3,20	0,149	0,074	306,4
208	3,04	0,143	0,078	321,4
248	3,09	0,145	0,073	304,9

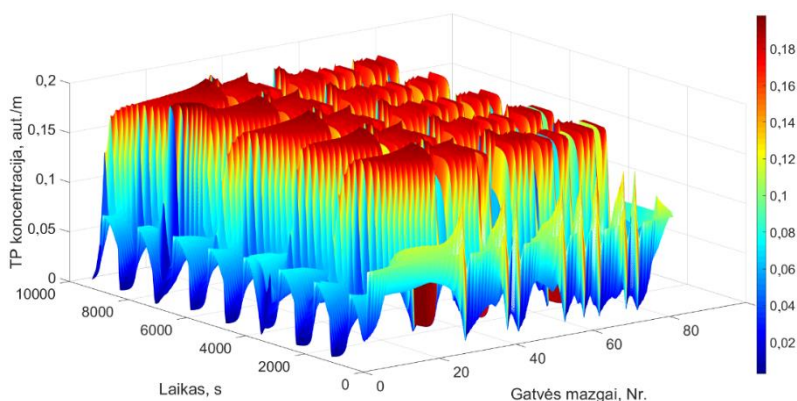
Apibendrinant 4.1 lentelėje gautas modeliavimo skaitines reikšmes, nubraižomos TS parametrų (TS greičio, eismo intensyvumo, TP koncentracijos, bendro TP skaičiaus) priklausomybė nuo šviesoforo signalų perjungimo periodo kreivės (4.2 pav.). Polinominės regresijos lygtys tiksliau atspindi TS parametrų gautas vidutines reikšmes priklausomai nuo šviesoforų periodų. Naudojant tiesines priklausomybes, nebūtų įmanoma nustatyti, kokiems šviesoforų signalų periodams esant TS parametrai beveik nebekinta. Esant skirtingiems šviesoforų perjungimo periodams nustatyta, kad vidutinis TS greitis pasiekia didžiausią reikšmę, esant  $T = 108$  s periodui. Mažinant arba didinant šviesoforų perjungimo periodą, vidutinis TS greitis mažėja. Nors eismo intensyvumas ir TP koncentracija vis didėja mažinant šviesoforų perjungimo periodą, bet racionalus periodas priimamas toks, kuris leidžia TP judėti greičiausiai. Tai mažina neigiamą įtaką aplinkai bei aplinkiniams žmonėms. Kadangi per dažnas šviesoforų signalų perjungimas priverčia vairuotojus nuolat stabdyti ir vėl įsibėgėti, o tai turi didžiausią neigiamą efektą TP išmetamųjų dujų emisijoms bei triukšmui, todėl nėra racionalu daugiau mažinti šviesoforų signalų perjungimo periodo.



**4.2 pav.** Transporto srauto parametrų priklausomybė nuo šviesoforo signalų perjungimo periodo trukmės: a) greičio; b) intensyvumo; c) koncentracijos; d) bendro transporto priemonių skaičiaus gatvėje

**Fig. 4.2.** Dependence of traffic flow parameters on the traffic light switching period: a) velocity; b) flow; c) density; d) total number of vehicles on the street

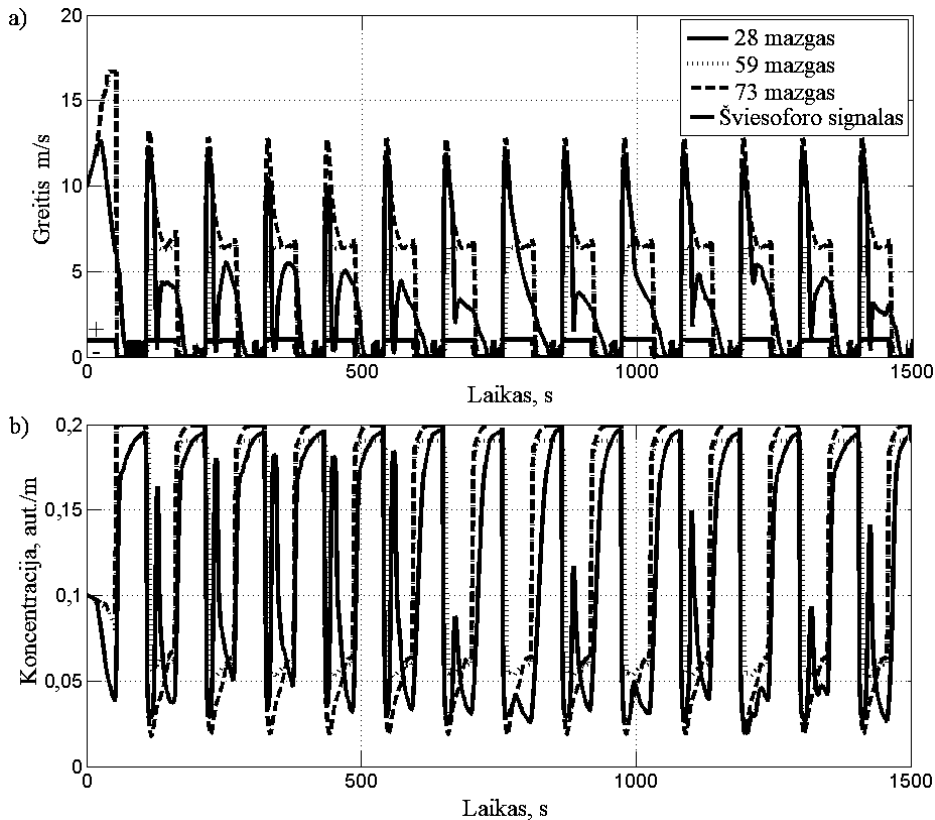
Tolesni rezultatai pateikiami esant  $T = 108$  s šviesoforų signalų perjungimo periodui, nustačius, jog tai yra racionalus šviesoforų perjungimo periodas modeliuojamoje gatvėje, siekiant gauti didžiausią vidutinį TS greitį. Patobulintas DTSTM leidžia tirti viso TS judėjimo dinamiką bet kuriame modeliuojamos gatvės mazge bet kuriuo laiko momentu (4.3 pav.), perjungiant šviesoforų signalus.



**4.3 pav.** Transporto priemonių koncentracijos kitimas laike, visuose tirtamos gatvės mazguose, esant  $T = 108$  s periodui

**Fig. 4.3.** Variation of vehicles density over time in all investigated street nodes at traffic light switching period  $T = 108$  s

Gautų rezultatų grafikuose (4.4 pav.) palyginta TS dinamika pirmoje reguliuojamoje sankryžoje, kuris modelyje atitinka gatvės 27 mazgą, didžiausioje modeliuojamos gatvės sankryžoje, atitinkančioje gatvės 58 mazgą, ir paskutinėje modeliuojamos gatvės sankryžoje, kuri yra gatvės 72 mazge, kai šviesoforų signalų perjungimo periodas  $T = 108$  s. Grafikuose šviesoforų signalų būseną parodyta įvardijant +, kai šviesoforuose įjungtas žalias signalas, ir -, kai įjungtas raudonas signalas.

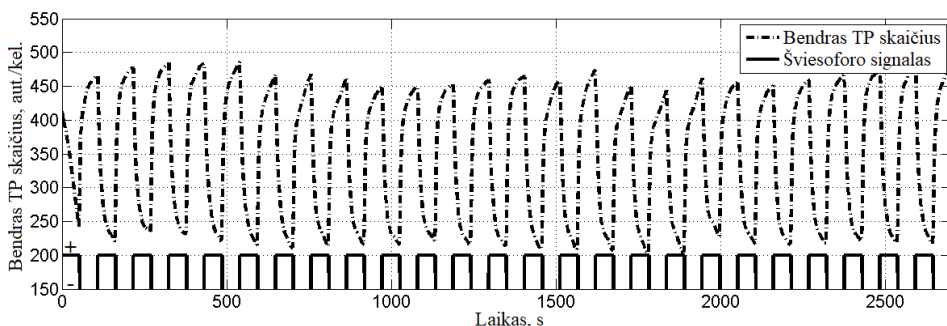


**4.4 pav.** Transporto srauto parametrų kitimas kai šviesoforų signalų perjungimo periodas  $T = 108$  s: a) greitis; b) koncentracija

**Fig. 4.4.** Variation of traffic flow parameters when traffic light switching period  $T = 108$  s: a) velocity; b) density

Pirmojo šviesoforo ciklo metu TS judėjimo greitis yra didžiausias (4.4 a. pav.), nes koncentracija visuose mazguose modeliavimo pradžioje yra lygi 0,1 aut./m (4.4 b. pav.), todėl modeliuojama gatvė nėra perpildyta. Po kelių švie-

soforų perjungimo ciklą TS tampa nusistovėjęs, tačiau laikui bėgant TP koncentracija modeliuojamos gatvės 27 mazge padidėja. Tai daro įtaką ir TS judėjimo greičiui, kuris svyruoja net ir esant žaliajam šviesoforo signalui. Tačiau tokių svyravimų nepastebima modeliuojamos gatvės 58 ir 72 mazguose. Bet TP koncentracija gatvės 58 mazge didesnė nei 72 mazge. Tai leidžia manyti, jog nedideli TP koncentracijos ir greičio svyravimai modeliuojamos gatvės paskutiniuose mazguose sukelia labai pastebimus svyravimus pirmuose mazguose, taip kintant TS parametrą pagal  $x$  koordinatę. Visi šie pokyčiai lemia ir bendro TP skaičiaus kitimą modeliuojamoje gatvėje (4.5 pav.).

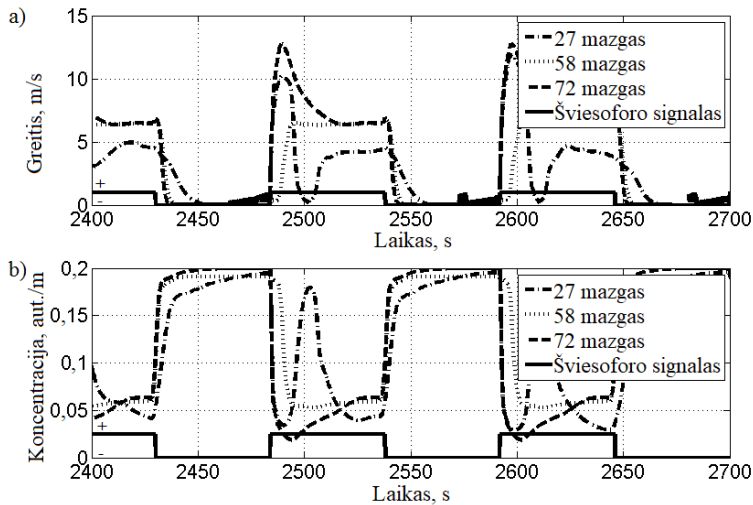


**4.5 pav.** Bendro gatvėje esančių transporto priemonių skaičiaus kitimas, kai šviesoforų signalų perjungimo periodas  $T = 108$  s

**Fig. 4.5.** Variation in the total number of vehicles on the street, when the traffic light switching period  $T = 108$  s

Didelis bendro TP skaičiaus kitimas laike (4.5 pav.) vyksta dėl to, kad modeliuojamos gatvės pabaigoje nėra periodiškai stabdančio šviesoforo, todėl TS gali judėti laisvai, o į modeliuojamą gatvę TS įvedamas  $T = 120$  s periodu. Todėl bendras TP skaičius gatvėje nuolat kinta laike.

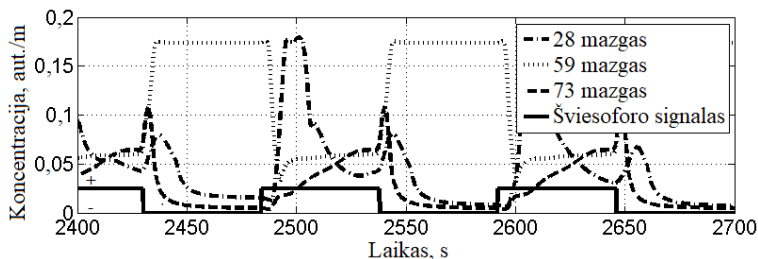
Grafikuose (4.6, 4.7 pav.) vaizduojami šviesoforų persijungimo ciklai, kuriuose pasireiškia TS dinaminiai procesai. Įsibėgėjimas vyksta iki maksimalaus leidžiamojo greičio arba iki priekyje judančio TS greičio (4.6 a. pav.). Rezultatai rodo, kad atskirose reguliuojamosiose sankryžose akivaizdžiai skiriasi TS greitis ir TP koncentracija (4.6 b. pav.). Paskutinėje modeliuojamos gatvės sankryžoje, pažymėtoje 72 mazgu, užsiedus žaliajam šviesoforo signalui pasiekiamas nustatytas didžiausias leidžiamas greitis, kadangi priekyje nėra reguliuojamųjų sankryžų. Tačiau toks greitis išlieka neilgam dėl didėjančios TP koncentracijos. Sankryžoje, kuri yra pažymėta gatvės 58 mazgu, maksimalaus leidžiamojo greičio nepasiekia dėl priekyje esančio šviesoforo, kuris yra vos už 200 m (4.1 pav.).



**4.6 pav.** Transporto srauto parametrų kitimas sankryžose, kai šviesoforų signalų perjungimo periodas  $T = 108$  s: a) greičio; b) koncentracijos

**Fig. 4.6.** Variation of traffic flow parameters at intersections, when traffic light switching period  $T = 108$  s: a) velocity; b) density

Dėl arti vienas kito esančių šviesoforų TP koncentracija už 58-tame mazge esančio šviesoforo (4.7 pav.) išlieka didelė, net ir degant raudonam šviesoforo signalui. Visuose mazguose nuo 58 iki 62 TS elgiasi analogiškai kaip ir pačioje sankryžoje. Tačiau šiuose mazguose TS greitis yra efektyviausias, tolygiai išibėgėja, išlaiko pastovų greitį visą žalio signalo laikotarpį ir tolygiai stabdo užsidegus raudonam signalui. Taip yra dėl to, kad visas automobilių srautas juda beveik vienu metu.



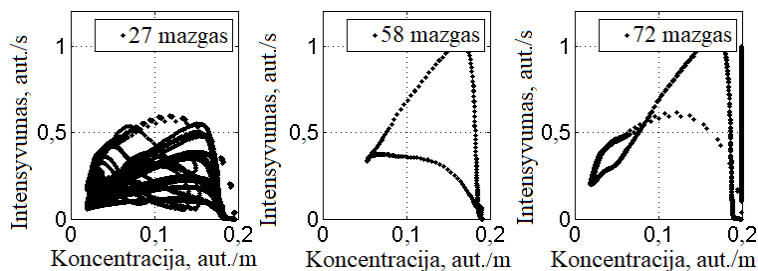
**4.7 pav.** Transporto priemonių koncentracijos kitimas už sankryžų, kai šviesoforų signalų perjungimo periodas  $T = 108$  s

**Fig. 4.7.** Variation of vehicle density behind intersections, when traffic light switching period  $T = 108$  s



Blogesnė situacija yra 27 mazge, nes degant žaliajam šviesoforo signalui TS juda labai netolygiai. Per žaliajo signalo laikotarpį TS staigiai įsibėgėja, tada dėl greitai išaugusios TP koncentracijos TS yra priverstas staigiai stabdyti ir vėl sumažėjus koncentracijai tenka įsibėgėti. Taip yra dėl to, kad priekyje esantis didesnės koncentracijos TS pristabdo atvažiuojantį TS, kuris ne iš karto gali įsibėgėti. Tokiu būdu tarytum banga padidėjusios TP koncentracijos pagal x ašį pereina per visą TS iki modeliuojamos gatvės pradžios, pristabdydama TS.

Paveiksluose (4.8 pav.) pateiktos TS rezultatų nuo 250 s fundamentalios kreivės skirtingose modeliuojamos gatvės sankryžose. Kreivės aiškiai parodo TS judėjimo tolygumą modeliuojamoje gatvėje. Minėtoje sankryžoje, pažymėtame 27 mazge, yra labai didelis rezultatų išsibarstymas, tai reiškia, kad esant tai pačiai TP koncentracijai, gali būti labai skirtingas eismo intensyvumas. Sankryžoje 58 mazge matomas visiškai kitoks pasiskirstymas, kuriame išsibarstymo beveik nėra, nes čia TS juda tolygiai.

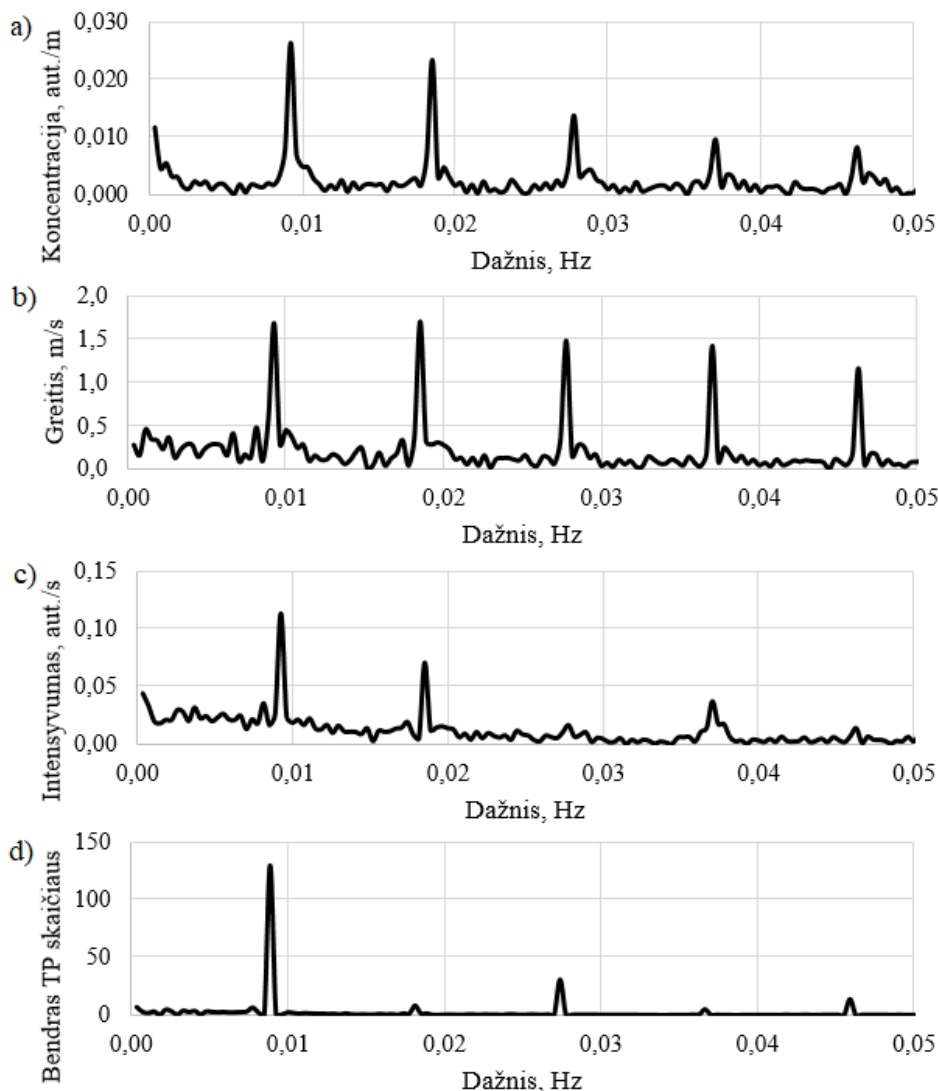


**4.8 pav.** Fundamentalios transporto srauto intensyvumo ir koncentracijos priklausomybės diagramos, kai šviesoforų signalų perjungimo periodas  $T = 108$  s  
**Fig. 4.8.** Fundamental diagrams of flow and density dependence, when traffic light switching period  $T = 108$  s

Naudojamas patobulintas DTSTM leidžia nagrinėti gatvių tinkle greitai kintančius TS dinامينius procesus kaip vientisą dinaminę sistemą su kintančiais sistemos parametrais, turinčiais savo dinamines charakteristikas. Dinaminės TS charakteristikos gali būti išreiškiamos TS parametrų priklausomybe nuo dažnio. Išskleidus TS parametrų funkcijas nuo laiko Furjė eilute, kai šviesoforų perjungimo periodas  $T = 108$  s, gaunamas jų spektras (4.9 pav.), kurį taikant galima nustatyti tam tikro gatvių tinklo savuosius dažnius.

Sutapus modeliuojamo TS saviems dažniams su šviesoforų valdymo dažniu nagrinėjamoje sistemoje įvyksta rezonansas. Grafikuose (4.9 pav.) tai yra pirmoji harmonika, kurios yra didžiausia amplitudė. Aukštesnių harmonikų amplitudės yra mažesnės už pirmos harmonikos amplitudes, kurios taip pat gali turėti

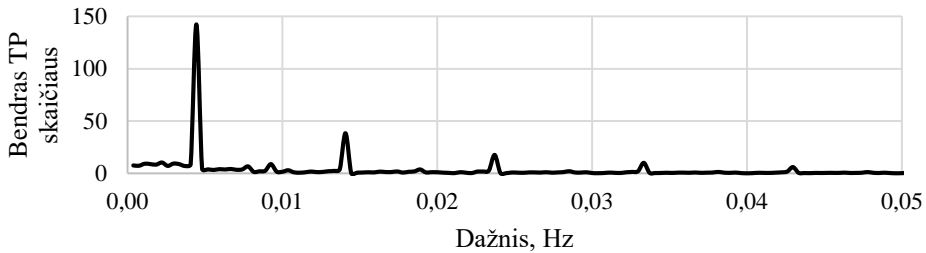
įtakos TS dinaminiais procesams. Todėl svarbu nagrinėti, koku šviesoforų valdymo režimu geriau valdyti TS. Ar kai sistema dirba rezonansiniu režimu, ar atvirkščiai.



**4.9 pav.** Transporto srauto parametrų amplitudžių spektrai: a) greičio; b) intensyvumo; c) koncentracijos; d) bendro automobilių skaičiaus, kai šviesoforų signalų perjungimo periodas  $T = 108$  s

**Fig. 4.9.** Traffic flow parameter amplitude spectra: a) velocity; b) flow; c) density; d) total number of vehicles, when traffic light switching period  $T = 108$  s

Pastebima, kad esant tam pačiam šviesoforų periodui TS eismo intensyvumo amplitudės nebūtinai su kiekviena harmonika gali mažėti. Amplitudės gali būti didesnės antroje ir ketvirtoje harmonikoje, o trečioji gali būti labai maža. TS greičio ir koncentracijos amplitudės su kiekviena harmonika mažėja.



**4.10 pav.** Bendrojo gatvėje esančių transporto priemonių skaičiaus kitimo amplitudžių spektras, kai šviesoforų signalų perjungimo periodas  $T = 208$  s

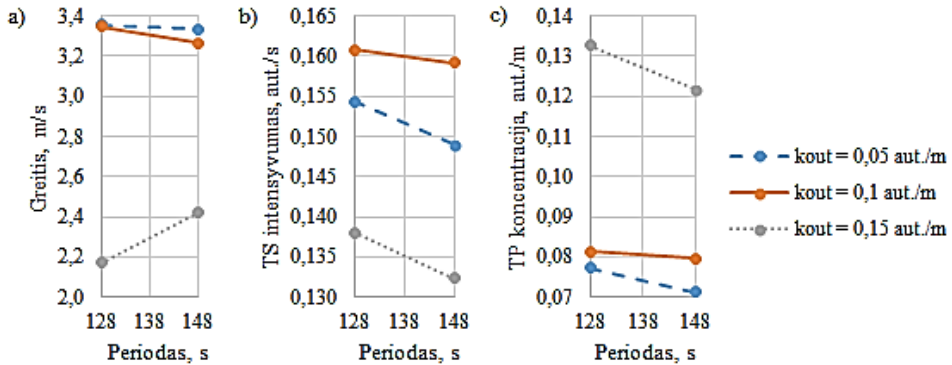
**Fig. 4.10.** Amplitude spectrum of the total number of vehicles on the street, when traffic light switching period  $T = 208$  s

Išskleidus TS parametrų pasiskirstymą Furjė eilute, kai periodas  $T = 208$  s, gauti rezultatai rodo (4.10 pav.), kad priklausomai nuo šviesoforų periodo dydžio pasikeičia dažniai spektre.

Rezultatai yra reikšmingi, nes jie rodo patobulinto DTSTM galimybes tiksliau modeliuoti TS skirtingomis sąlygomis. Tai leidžia stebėti dinامينius TS rodiklius bet kuriame modeliuojamos gatvės mazge bet kuriuo metu. Teorinių modeliavimo rezultatų, pagrįstų eksperimentiniais tyrimais, patikimumas patvirtina metodo tinkamumą naudoti jį siekiant optimizuoti tikrųjų TS judėjimą. Nustačius racionalų šviesoforo periodą visiems šviesoforams modeliuojamoje gatvėje, veikiantiems tuo pačiu režimu, tolesni tyrimai gali būti atliekami nustatant kiekvieno šviesoforo jungimo ciklus individualiai. Šiam tikslui gali būti naudingas TS amplitudės parametrų spektras, nustatant, koks šviesoforų harmoninis dažnis turi teigiamą įtaką TS. Taip pat galima keisti šviesoforų perjungimo laikotarpius, atsižvelgiant į pasikeitusias eismo sąlygas modeliuojamame gatvės pirmame ir paskutiniame mazguose.

Siekiant nustatyti, kaip keičiasi TS dinaminiai procesai modeliuojamoje gatvėje priklausomai nuo sąlygų gatvės pabaigoje ir šviesoforų signalų periodo reguliuojamose sankryžose, buvo modeliuojama su skirtingomis TP koncentracijos reikšmėmis  $k_{out} = (0,05; 0,1; 0,15)$  aut./m modeliuojamos gatvės paskutiniame mazge.

Paveiksluose (4.11 pav.) pateikti modeliujamos gatvės vidutinio greičio, eismo intensyvumo ir TP koncentracijos palyginimų rezultatai, esant skirtingoms TP koncentracijoms modeliujamos gatvės paskutiniame mazge.



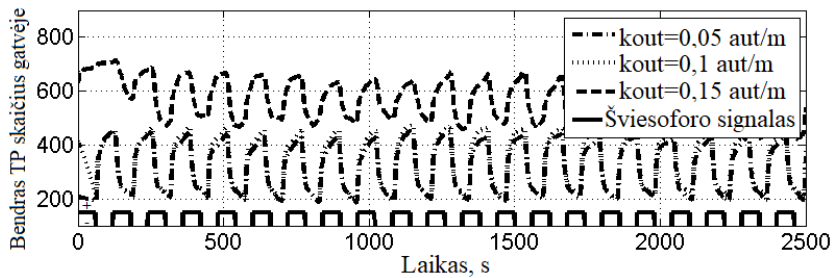
**4.11 pav.** Transporto srauto parametrų vidutinių reikšmių palyginimas esant skirtingoms transporto priemonių koncentracijoms modeliujamos gatvės paskutiniame mazge: a) greičių; b) intensyvumo; c) koncentracijos

**Fig. 4.11.** Comparison of the average values of traffic flow parameters at different vehicle densities at the last node of the modeled street: a) velocity; b) flow; c) density

Iš šių rezultatų matyti, kad iki TP koncentracijos modeliujamos gatvės išėjime  $k_{out} = 0,1$  aut./m reikšmės transporto spūstys nesusidaro, o viršijus  $k_{out} = 0,1$  aut./m reikšmę, išauga koncentracija visoje gatvėje bei sumažėja greitis, dėl to didėja spūstys gatvėje.

Paveiksle (4.12 pav.) parodytas bendras TP skaičiaus kitimas visoje modeliujamoje gatvėje, kai šviesoforų signalų perjungimo periodas  $T = 128$  s, o TP koncentracijos  $k_{out} = (0,05; 0,1; 0,15)$  aut./m paskutiniame modeliujamos gatvės mazge.

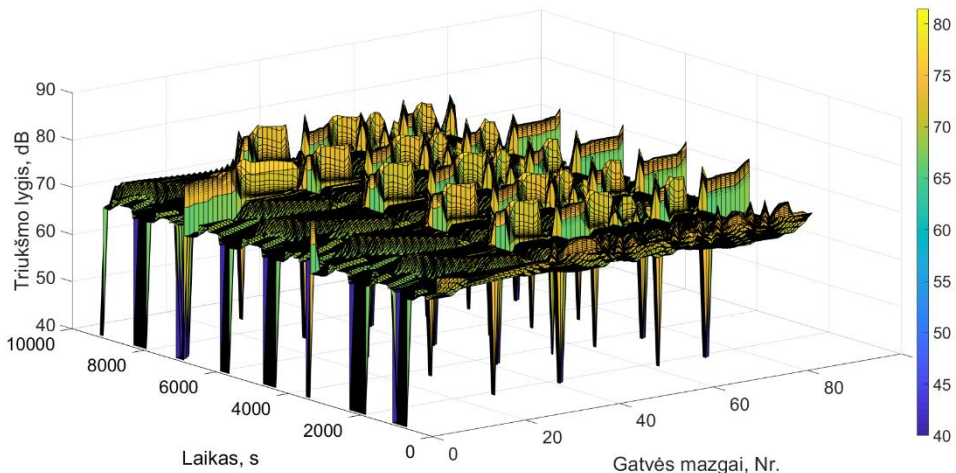
Nustačius vidutinės bendro gatvėje esančių TP skaičiaus kitimo reikšmes ir atlikus skaičiavimus pagal (2.6) lygtį, nustatytas skirtumas tarp šių rezultatų. Kai TP koncentracija  $k_{out} = 0,1$  aut./m paskutiniame modeliujamos gatvės mazge padidinama iki  $k_{out} = 0,15$ , padidėja ir bendras TP skaičius gatvėje 34,4 %, tai turi neigiamos įtakos TS, o kai sumažinama iki  $k_{out} = 0,05$  aut./m, bendras TP skaičius visoje gatvėje sumažėja 11,8 %, tai turi teigiamos įtakos TS.



**4.12 pav.** Bendro gatvėje esančių transporto priemonių skaičiaus kitimo palyginimas, esant transporto priemonių koncentracijoms  $k_{out} = (0,05; 0,1; 0,15)$  aut./m modeliuojamos gatvės paskutiniame mazge, kai šviesoforų signalų perjungimo periodas  $T = 128$  s

**Fig. 4.12.** Comparison of the variation in the total number of vehicles on the street, when the traffic density  $k_{out} = (0.05; 0.1; 0.15)$  veh./m at the last node of the modeled street, and the traffic light switching period  $T = 128$  s

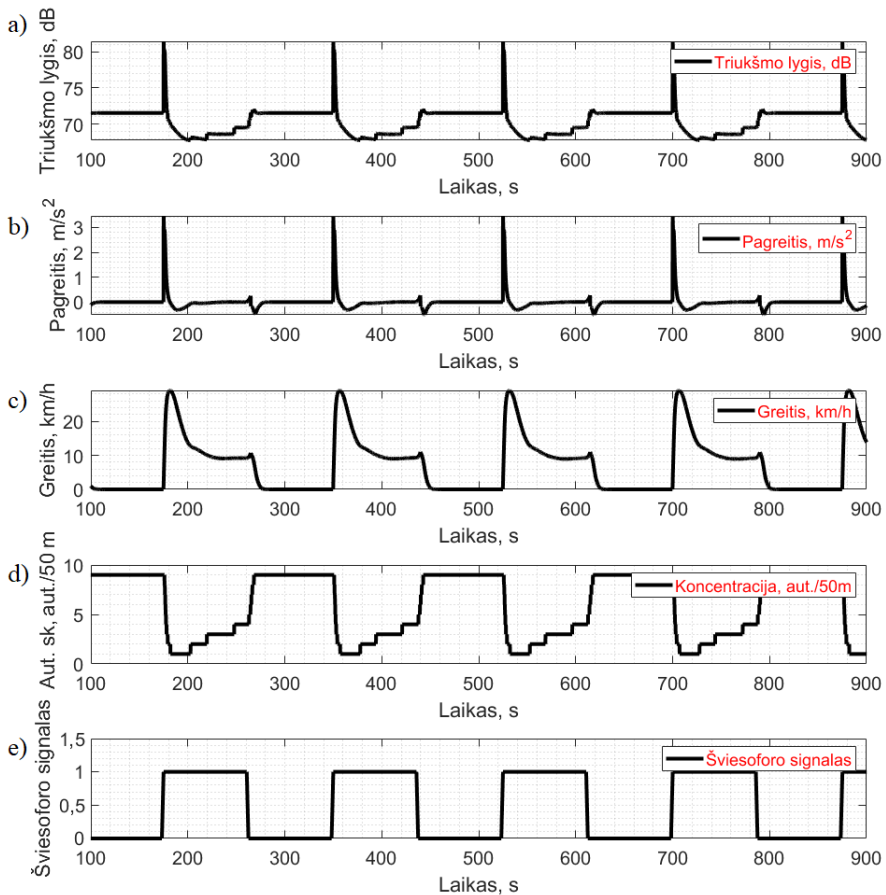
Panaudojant patobulinto DTSTM gautus TS dinaminių procesų rezultatus sukurtoje MTLTM gaunami modeliuojamos gatvės momentinio triukšmo lygio (MTL) rezultatai (4.13 pav.). Visoje gatvėje MTL kinta nuo modeliuojamai gatvei būdingo foninio triukšmo lygio (40 dB) iki 81,4 dB. Rezultatams gauti įvedama sąlyga, kad TS sudaro homogeninis TS, tai yra naudojama tik lengvųjų automobilių, važiuojančių sausa asfalto danga (ACO 11), regresijos lygtis.



**4.13 pav.** Transporto srauto skleidžiamo momentinio triukšmo lygio kitimas laike visuose tiriamos gatvės mazguose

**Fig. 4.13.** Variation of traffic flow emitted instantaneous noise level in time, for all of the nodes in the street

MTL kitimas laike parodytas 4.14 a. paveiksle, kuris priklauso nuo TS pagreičio (4.14 b. pav.), TS greičio (4.14 c. pav.) ir TP skaičiaus (4.14 d. pav.) modeliuojamos gatvės mazge. Užsidegus žaliajam šviesoforo signalui (4.14 e. pav.), grafike parodoma signalo reikšmė 1, o užsidegus raudonam signalui – 0. Šie rezultatai rodo, kaip padidėjus TS pagreičiui, kai užsidega žalias šviesoforo signalas, kartu gerokai padidėja ir TS skleidžiamas MTL. Taip pat matoma, kad didėjant TP skaičiui, bet esant pastoviam TS greičiui, palaipsniui didėja MTL. Nežymiai mažėjant ar didėjant TS greičiui taip pat nežymiai kinta MTL.



**4.14 pav.** Momentinio triukšmo lygio ir transporto srauto parametrų priklausomybė nuo laiko: a) triukšmo lygio; b) pagreičio; c) greičio; d) transporto priemonių skaičiaus; e) šviesoforo, 41-mame gatvės mazge

**Fig. 4.14.** Time dependence of instantaneous noise level and traffic flow parameters: a) noise level; b) acceleration; c) velocity; d) number of vehicles; e) traffic signal, at 41st street node

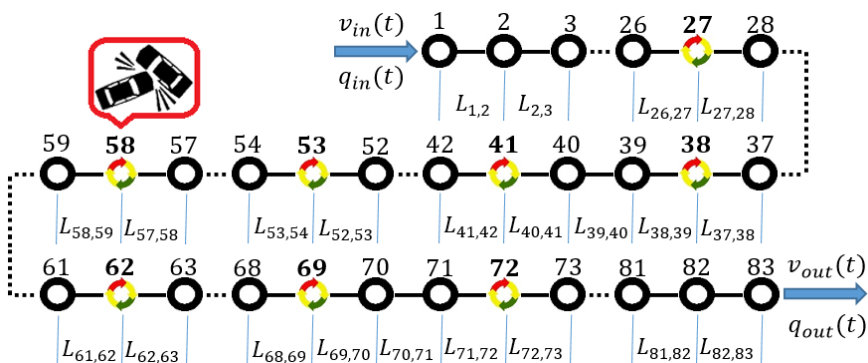
Didžiausios triukšmo lygio reikšmės nustatytos 41 mazge. Šiuo numeriu pažymėta viena iš modeliujamos gatvės vieno laipsnio reguliuojama šviesoforais sankryža. Čia didžiausias MTL yra 81,4 dB, kai TS pradeda judėti įsijungus žaliajam šviesoforo signalui, nes tuo metu TS judėjimo pagreičiai ( $3,46 \text{ m/s}^2$ ) ir TP koncentracija ( $0,18 \text{ aut./m}$ ) yra didžiausi, o TS greitis yra  $0,65 \text{ m/s}$ .

Remiantis šiais rezultatais, galima valdyti TS, siekiant sumažinti MTL gatvėse, valdant šviesoforų signalų jungimosi periodus. Dėl pagreičio didžiausią įtaką turinčiam parametru tikslinga būtų nustatyti šviesoforų persijungimą žaliajai bangai gauti. Tokiu būdu TS nestabdomas galėtų judėti pastoviu greičiu per visą kelio ruožą.

### 4.3. Eismo įvykio įtaka transporto srauto dinaminiam procesams ir momentiniam triukšmo lygiui

Siekiant ištirti, kokią įtaką TS dinaminiam procesams ir MTL turi netikėtos kliūtyse kelyje, buvo iškeltas tikslas – ištirti TS dinaminį procesų pokyčius eismo įvykio metu ir jį pašalinus.

Modeliuojamoje gatvėje tuo pačiu metu visuose kontroliuojamųjų sankryžų šviesoforuose užsidega žalia arba raudona šviesa, kaip ir 4.2 poskyryje atliktų TS tyrimų atveju. Šviesoforo signalo perjungimo laikotarpis  $T = 120 \text{ s}$ . Šviesoforo signalo perjungimo periodas  $T = 120 \text{ s}$  susideda iš 4 s geltonojo, 56 s žalios spalvos signalo, 4 s geltonojo signalo ir 56 s raudonojo signalo.

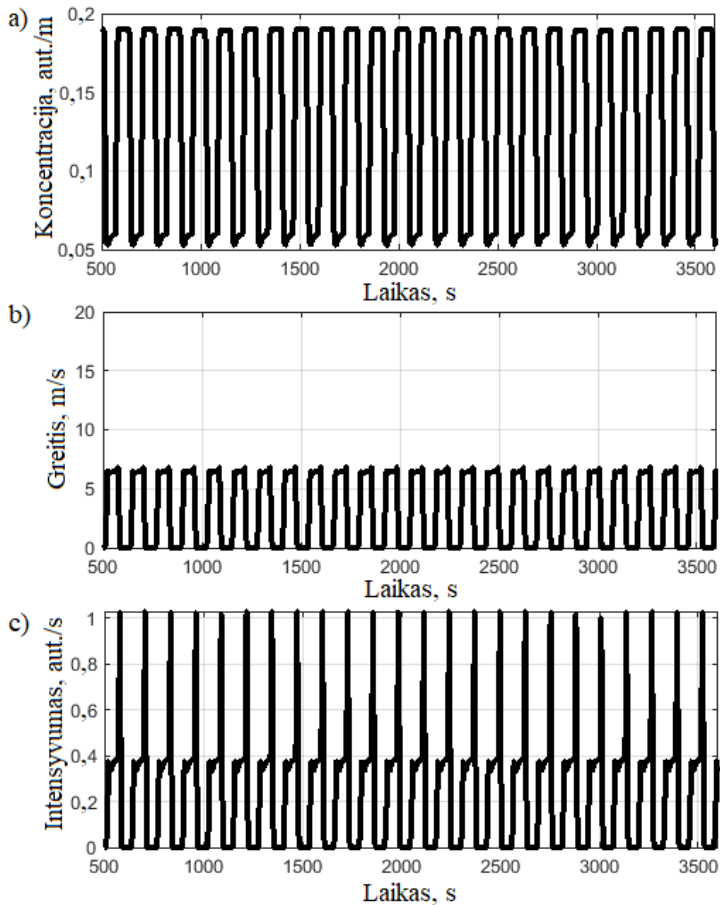


**4.15 pav.** Vienos krypties gatvės ruožo skaičiavimo schema su eismo įvykio vieta gatvės modelyje: ○ – gatvės mazgas be šviesoforo; ● – gatvės mazgas su šviesoforu

**Fig. 4.15.** One-way street section calculation scheme, with the location of the traffic accident, in a street model: ○ – street node without traffic light; ● – street node with traffic light

Eismo įvykis modeliuojamas 58 gatvės mazge (4.15 pav.), kuris atsiranda 3700-tos modeliavimo sekundės metu. Susidariusi kliūtis beveik visiškai sustabdo TS. Modeliuojamas eismo įvykis pašalinamas po 5, 10, 20 ir 30 min.

Gauti rezultatai rodo, kad TS parametrai (TS greitis, TP koncentracija, eismo intensyvumas) iki eismo įvykio kinta pastoviu ritmu (4.16 pav.), kurį nurodo švie-soforų signalų perjungimo periodas.



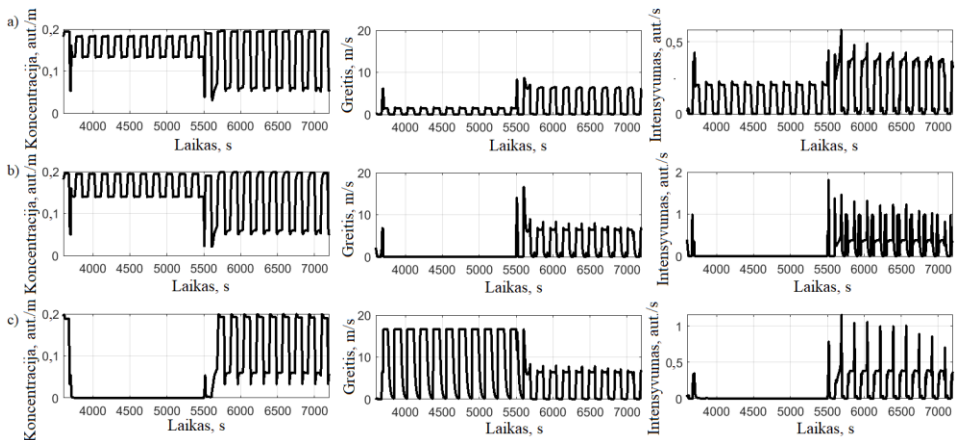
**4.16 pav.** Transporto srauto parametrų kitimas prieš įvykstant eismo įvykiui: a) koncentracijos; b) greičio; c) intensyvumo, 58 mazge

**Fig. 4.16.** Variation of traffic flow parameters, before the occurrence of a traffic accident: a) density; b) velocity; c) flow, at 58 node

Įvykus eismo įvykiui 58 modeliuojamos gatvės mazge atsiranda kliūtis gatvėje. Dėl šios kliūties gatvės laidumas tampa labai mažas. Prieš susidariusią kliūtį



TP koncentracija stipriai išauga, greitis žalia šviesoforo signalo metu yra labai mažas. Dėl to gaunamas mažas eismo intensyvumas (4.17 pav.).

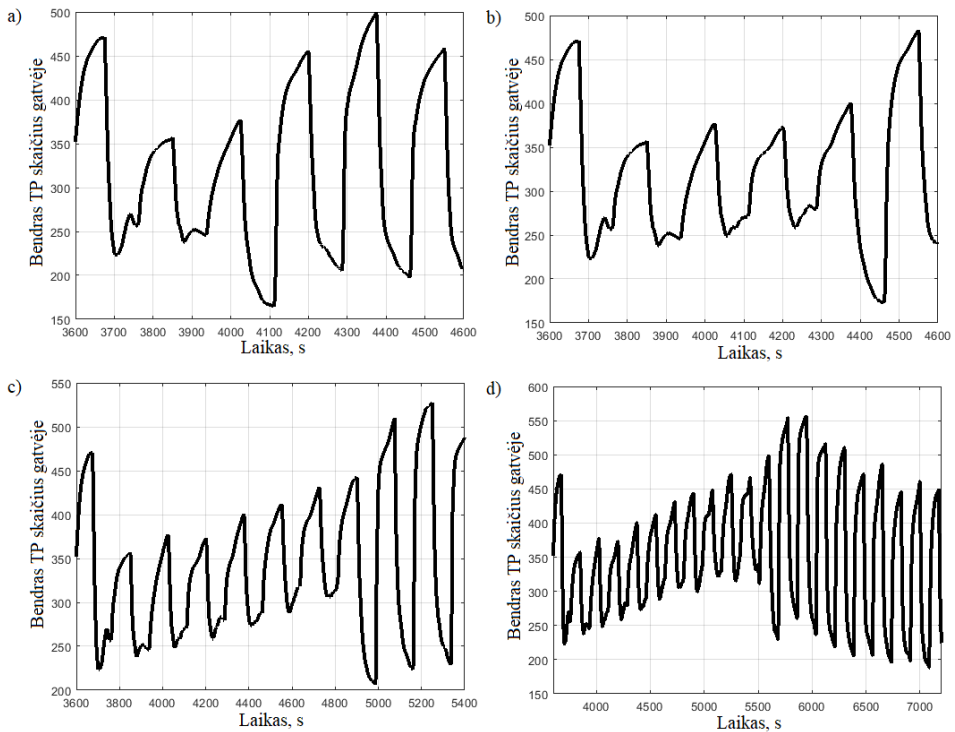


**4.17 pav.** Transporto srauto parametrų kitimas, kai eismo įvykio pašalinimo trukmė yra 30 minučių: a) 57 mazge; b) 58 mazge; c) 59 mazge

**Fig. 4.17.** Variation of traffic flow parameters, when the elimination time of a traffic accident is 30 minutes at: a) 57 node; b) 58 node; c) 59 node

Rezultatai rodo, kad sankryžoje, kurioje įvyko eismo įvykis, žalia šviesoforo signalo metu greitis artimas 0 km/h, nes TP kliūtį pravažiuoja labai lėtai. Pravažėjęs kliūtį, TP gali įsibėgėti iki maksimalaus leidžiamojo greičio, nes už eismo įvykio vietos TP koncentracija gatvėje lygi 0 aut./m. Eismo intensyvumas išlieka labai mažas, nes pravažiuojančių kliūtį TP skaičius yra labai mažas.

Analizuojant rezultatus, galima pastebėti, kad, įvykus eismo įvykiui, TP skaičius staiga sumažėja visoje modeliujamoje gatvėje (4.18 pav.). Taip yra todėl, kad ištuštėja gatvės elementai už eismo įvykio vietos. Bet tuo pačiu metu gatvės mazge priešais eismo įvykio vietą TP koncentracija didėja dėl periodiškai įvažiuojančių TP į modeliujamą gatvę. Todėl bendras TP skaičius nuolat didėja. Priklausomai nuo eismo įvykio pašalinimo trukmės bendras TP skaičius gali būti didesnis nei buvo prieš eismo įvykį, nors ir gatvės ruožas už susidariusios kliūties tampa beveik tuščias.



**4.18 pav.** Bendro gatvėje esančių transporto priemonių skaičiaus kitimas laike, esant: a) 5 min.; b) 10 min.; c) 20 min. ir d) 30 min. eismo įvykio pašalinimo trukmei

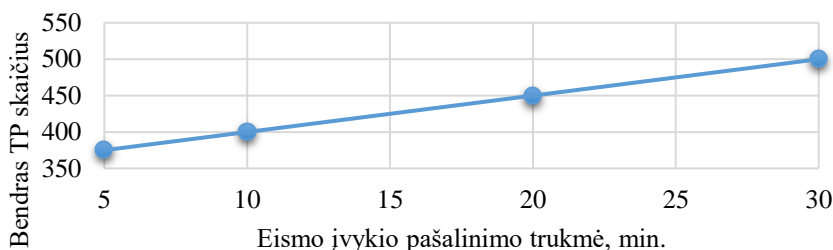
**Fig. 4.18.** Variation in the total number of vehicles on the street, when traffic accident elimination times are: a) 5 min.; b) 10 min.; c) 20 min. and d) 30 min.

Kuo ilgiau užtrunkama pašalinti kliūtį gatvėje, tuo didesnis TP skaičius yra modeliuojamoje gatvėje, kuris priklauso pagal artimą tiesinei priklausomybę (4.19 pav.).

Apibendrinus rezultatus, rodančius bendrą automobilių skaičių įvykus eismo įvykiui, pastebima, kad yra tiesinė priklausomybė tarp automobilių skaičiaus vi-soje modeliuojamoje gatvėje ir eismo įvykio pašalinimo trukmės (4.1). Skaitinės reikšmės tiesinės priklausomybės lygtyje reiškia, kad eismo įvykio pašalinimo trukmės mažiausia reikšmė yra 5 min x ašyje, o mažiausia bendro TP skaičiaus reikšmė yra 350.

$$N = 5x + 350, \quad (4.1)$$

čia  $N$  – bendras automobilių skaičius modeliuojamoje gatvėje;  $x$  – eismo įvykių pašalinimo trukmė, min.



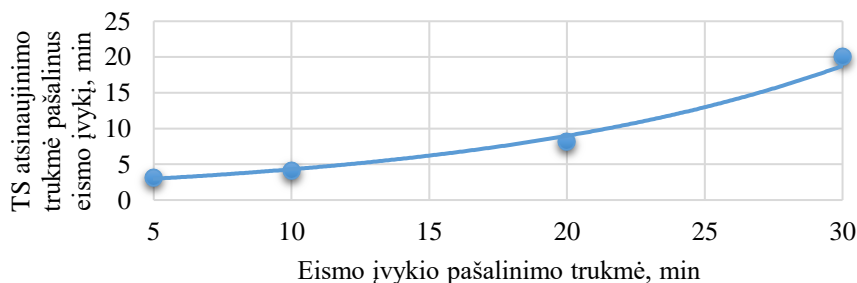
**4.19 pav.** Bendro gatvėje esančių transporto priemonių skaičiaus prieš eismo įvykio pašalinimą priklausomybė nuo eismo įvykio pašalinimo trukmės

**Fig. 4.19.** Dependence of the total number of vehicles, before the traffic accident removal on the duration of the traffic accident elimination

TS, pašalinus eismo įvykį, negrįžta į pradinę būseną iš karto, nes jis kurį laiką būna išbalansuotas. Iš rezultatų matyti, kad TS atsinaujinimo trukmė kinta pagal eksponentinę funkciją (4.2). Pašalinus eismo įvykių pasekmes, TS sugrįžta iki pradinės nusistovėjusios būsenos, kuri buvo iki eismo įvykio: per 3 min. 20 s kai eismo įvykis pašalinamas per 5 min.; per 4 min. 10 s, kai – per 10 min.; per 8 min. 20 s, kai – per 20 min.; per 20 min., kai – per 30 min. Skaitinės reikšmės eksponentinės priklausomybės lygtyje reiškia, kad pradinė TS atsinaujinimo trukmė 2,06 min., kai eismo įvykio pašalinimo trukmės reikšmė yra 0 min, o 0,074 – TS atsinaujinimo trukmės didėjimo konstanta.

$$y = 2,06e^{0,074x}, \quad (4.2)$$

čia  $y$  – TS atsinaujinimo trukmė pašalinus eismo įvykį, min.;  $x$  – eismo įvykių pašalinimo trukmė, min.

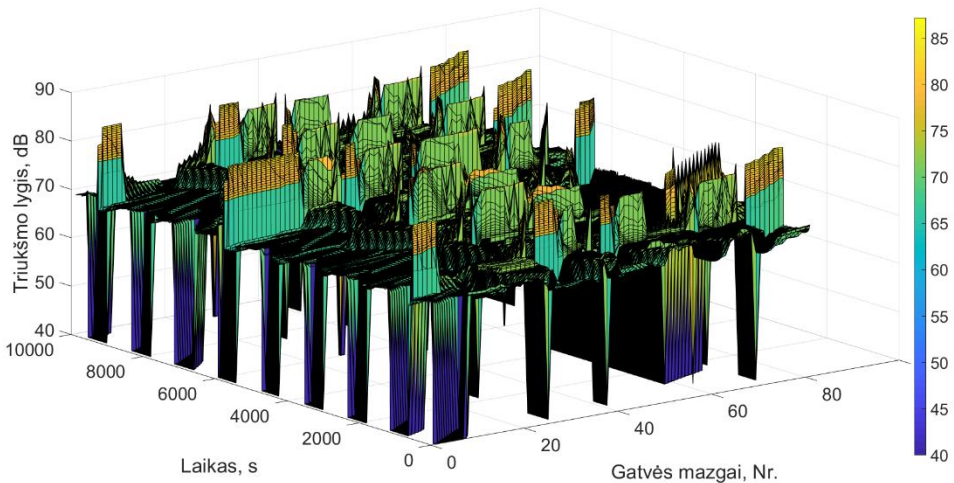


**4.20 pav.** Transporto srauto sugrįžimo iki pradinės būsenos trukmės, pašalinus eismo įvykį, priklausomybė nuo eismo įvykio pašalinimo trukmės

**Fig. 4.20.** Dependence of traffic flow recovery time, up to the initial state, after the removal of the traffic accident, on the duration of the removal of the traffic accident

Tai reiškia, kad ilgėjant eismo įvykio pašalinimo trukmei, vis labiau ilgėja trukmė, per kurią TS sugrįžta iki pradinės nusistovėjusios būsenos (4.20 pav.).

Panaudojant patobulinto DTSTM gautus TS dinaminių procesų rezultatus ir pritaikant juos MTLTM, buvo nustatyta eismo įvykio įtaka triukšmo lygiui (4.21 pav.). Visoje gatvėje MTL kinta nuo modeliuojamai gatvei būdingo foninio triukšmo lygio (40 dB) iki 87,2 dB.

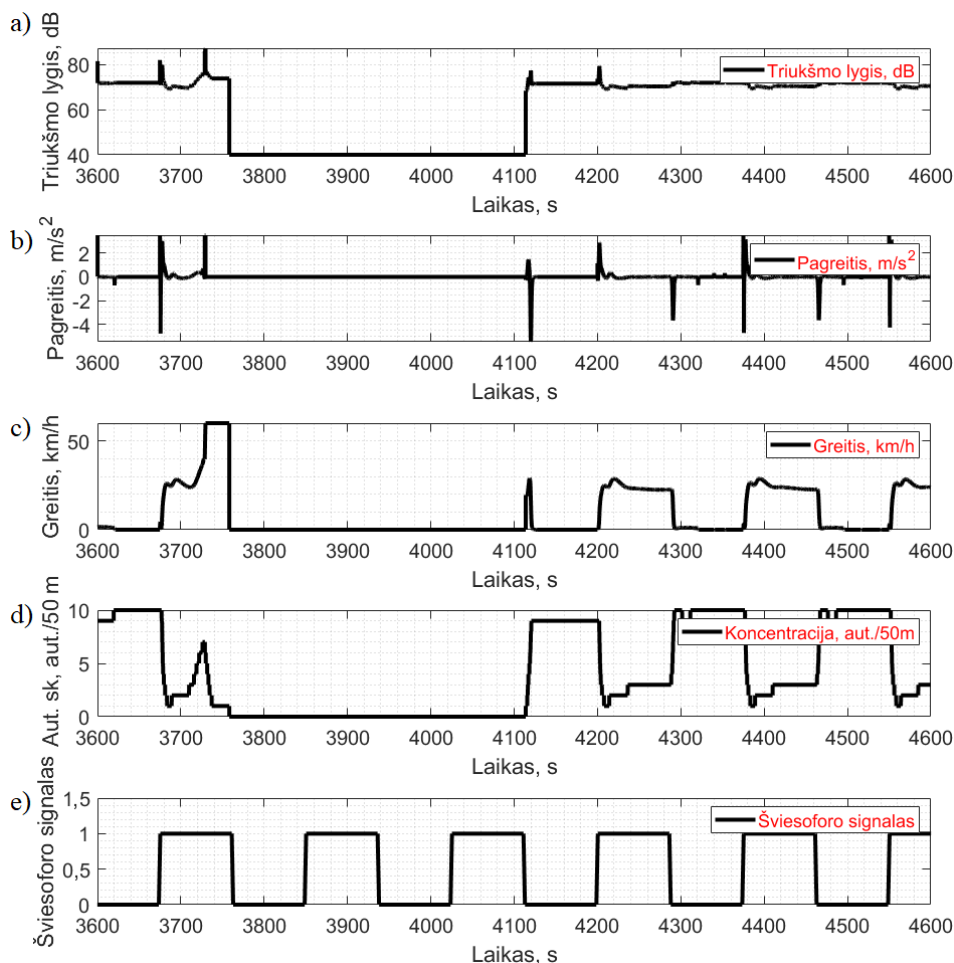


**4.21 pav.** Transporto srauto skleidžiamo momentinio triukšmo lygio kitimas laike visuose tiramos gatvės mazguose eismo įvykio metu

**Fig. 4.21.** Variation of traffic flow emitted instantaneous noise level in time, for all of the nodes in the street, during a traffic accident

Gavės ruožuose, kuriuose nėra arti reguliuojamų sankryžų, pastebima, kad triukšmo lygio svyravimai yra beveik nepastebimi. Tam įtakos turi, tai kad TP čia nesustoja ir važiuoja pastoviu greičiu. Todėl koncentracija šiose vietose įprastomis sąlygomis neišauga. Tuose gatvės maguose, kuriuose yra reguliuojamos sankryžos ir gretimuose mazguose pastebimi ryškūs TL padidėjimai. Tačiau jie netrunka ilgai, tik tol, kol TS išibėgėja ir sumažėja TP koncentracija. Už eismo gatvės mazgo, kuriame buvo eismo įvykis, matomas grafiko plotas, kurio TL reikšmė yra lygi foniniam TL, būdingam tai gatvei. Tokia TL sumažėjimo zona tęsiasi iki pat paskutinio gatvės mazgo, per visą eismo įvykio šalinimo laikotarpį.

Didžiausios triukšmo lygio reikšmės nustatytos 71 mazge. Šis modeliujamos gatvės mazgas yra prieš vieno laipsnio, reguliuojamą šviesoforais sankryžą. Čia didžiausias MTL yra 87,2 dB, kai TS judėjimo pagreitis  $3,5 \text{ m/s}^2$ , kuris padidėjo ištuštėjus gatvei, ir TP koncentracija 0,12 aut./m, o TS greitis yra 16,6 m/s.



**4.22 pav.** Momentinio triukšmo lygio ir transporto srauto parametrų priklausomybė nuo laiko: a) triukšmo lygio; b) pagreičio; c) greičio; d) transporto priemonių skaičiaus; e) šviesoforo, esant eismo įvykiui metu 71 gatvės mazge

**Fig. 4.22.** Time dependence of instantaneous noise level and traffic flow parameters: a) noise level; b) acceleration; c) velocity; d) number of vehicles; e) traffic signal, during a traffic accident, at 71st street node

Kol eismo įvykis nėra pašalintas, už sankryžos, kurioje yra eismo įvykis, TP nevažiuoja (4.22 d. pav.). Tuomet MTL (4.22 a. pav.) prilyginamas foniniam TL, būdingam tai gatvei, kai nėra netoliese TP. Vos tik gatvė atsilaisvina, eismas vėl pradeda grįžti į nusistovėjusią būseną (4.22 c. pav.). Tada vėl matoma, kad didžiausi MTL pikai yra tada, kai TP pradeda judėti užsidegus žaliajam šviesoforo

signalui (4.22 e. pav.). Tam įtakos turi padidėjęs pagreitis TS išibėgėjant (4.22 b. pav.).

Gauti kintantys momentinio triukšmo lygio duomenys leidžia gauti tikslesnes valandos ar paros TL reikšmes, kurios taip pat leistų sudaryti tikslesnius TL žemėlapius.

#### 4.4. Ketvirtąjo skyriaus išvados

1. Teorinių tyrimų rezultatai rodo, kad norint gauti didžiausią 12,2 km/h vidutinį TS greitį piko metu, esant didelei TP koncentracijai  $k_i = 0,1$  aut./m, racionali šviesoforo periodo trukmė modeliuojamoje gatvėje yra  $T = 108$  s.
2. TS parametrų rezultatai leidžia analizuoti modeliuojamos gatvės TS dinaminį procesą, priklausomai nuo tiriamų kraštinių sąlygų. Kai TP koncentracija  $k_{out} = 0,1$  aut./m, paskutiniame modeliuojamos gatvės mazge padidinama iki  $k_{out} = 0,15$  aut./m, padidėja ir bendras TP skaičius gatvėje 34,4 %, kas turi neigiamos įtakos TS, o kai sumažinama iki  $k_{out} = 0,05$  aut./m, bendras TP skaičius visoje gatvėje sumažėja 11,8 % ir tai turi teigiamos įtakos TS.
3. Eismo įvykių pašalinimo trukmė turi įtakos TS parametrų. Ilgėjant eismo įvykių pasekmių pašalinimo trukmei, TS atsistatymo trukmė iki pradinės nusistovėjusios būsenos, kuri buvo iki eismo įvykio, didėja pagal eksponentinę priklausomybę.
4. Modeliavimo rezultatai rodo, kad ilgėjant eismo įvykių pasekmių pašalinimo trukmei, bendras TP skaičius gatvėje didėja pagal tiesinę priklausomybę.
5. Modeliuojant triukšmo lygį šalia sankryžų, gauta, kad triukšmo lygis kinta nuo 40 dB iki 81,4 dB, kai nėra eismo įvykio modeliuojamoje gatvėje ir nuo 40 dB iki 87,2 dB, kai yra eismo įvykis.

---

## Bendrosios išvados

1. Atlikus transporto srautų dinaminių procesų eksperimentinius tyrimus, nustatytas TS greičio kitimas, užsidegus žaliajam šviesoforo signalui, kuris leido patobulinti diskretinį transporto srauto tyrimo metodą. Patikslinti TS pagreičiai, kai TS pradeda judėti užsidegus žaliajam šviesoforo signalui. Pateiktas patobulintas TS tyrimo metodas, patikslinus kintamus koeficientus, kurie leido gauti daugiau nei 3 kartus tikslesnius TS judėjimo parametrus.
2. Pritaikius patobulintą diskretinį transporto srauto tyrimo metodą, nustatyta, kad didėjant šviesoforų signalų persijungimo periodo trukmei nuo 108 iki 248 s, mažėja vidutinės TS parametrų (greičio, TP koncentracijos, eismo intensyvumo) reikšmės. Esant intensyviai TS, kai TP pradinė koncentracija yra 0,1 aut./m, nustatytas racionalus šviesoforų persijungimo periodas 108 s.
3. Pritaikius patobulintą diskretinį transporto srauto tyrimo metodą, nustatyta, kad tarp eismo įvykių pašalinimo trukmės ir didėjančio TP skaičiaus gatvėje yra artima tiesinei priklausomybė, o tarp eismo įvykių pašalinimo trukmės ir TS sugrįžimo iki pradinės nusistovėjusios būsenos – netiesinė priklausomybė (eksponentė).

4. Atlikus transporto srauto skleidžiamo triukšmo lygio eksperimentinius tyrimus, kuriais buvo įvertinta kelio dangos būklė, transporto priemonių važiavimo greitis, kategorija, buvo sukurta transporto srauto skleidžiamo triukšmo lygio tyrimo metodika, leidžianti įvertinti momentinį triukšmo lygį bet kuriame mazge.
5. Taikant patobulintą diskretinį transporto srauto tyrimo metodą ir sukurta transporto srauto skleidžiamo momentinio triukšmo lygio tyrimo metodiką, nustatytas momentinis didžiausias triukšmo lygis šalia sankryžų, kuris kinta iki 81,4 dB, kai nėra eismo įvykio modeliuojamoje gatvėje, o kai yra eismo įvykis – iki 87,2 dB, kai TP koncentracija 0,12 aut./m ir TS greitis yra 16,6 m/s.



---

## Literatūra ir šaltiniai

Almeida, A. M. R.; Leite, J. L. A.; Macedo, J. A. F.; Machado, J. C. 2017. GPS2GR: Optimized Urban Green Routes Based on GPS Trajectories. *IWGS'17: Proceedings of the 8th ACM SIGSPATIAL Workshop on Geo Streaming November 2017*. Pages 39–48. <https://doi.org/10.1145/3148160.3148167>

Astarita, V.; Festa, D. C.; Giofrèa, V. P.; Guido, G. 2019. Surrogate Safety Measures from Traffic Simulation Models a Comparison of Different Models for Intersection Safety Evaluation. *Transportation Research*. 37: 219–226. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.186>

Bazaras, J.; Jablonskytė, J.; Jotautienė, E. 2008. Interdependence of Noise and Traffic Flow. *Transport*. 23(1): 67–72. <https://doi.org/10.3846/1648-4142.2008.23.67-72>

Beckenbauer, T. 2011. Lärmarme Fahrbahnbeläge: Mehrwert bei der Straßensanierung, in ALD-Herbstveranstaltung „Lärm in der Stadt“ 15. November 2011, Berlin, Deutschland, 31 S. Available from Internet: [https://www.muellerbbm.de/fileadmin/user\\_upload/gmbh/Veroeffentlichungen/2011/2011-12-21-05.pdf](https://www.muellerbbm.de/fileadmin/user_upload/gmbh/Veroeffentlichungen/2011/2011-12-21-05.pdf) (in German).

Bellucci, P.; Cipriani, E. 2010. Data Accuracy on Automatic Traffic Counting: The SMART Project Results. *European Transport Research Review*. 2(4): 175–187. <https://doi.org/10.1007/s12544-010-0039-9>

Bellucci, P.; Cipriani, E. 2005. Smart Project: Field Test Results of Different Traffic Monitoring Technologies. Conference report, *European Transport Conference Italy*.

- Bogdevičius, M.; Junevičius, R. 2014. Investigation of traffic flow dynamic processes using discrete model. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 21 (4): 15–19. <https://doi.org/10.5604/12314005.1130421>
- Bokare, P. S.; Maurya, A. K. 2017. Acceleration-Deceleration Behaviour of Various Vehicle Types. *Transportation Research Procedia*, 25: 4733–4749. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.486>
- Burinskienė, M.; Klibavičius, V.; Grigonis, V.; Ušpalytė-Vitkūnienė, R. 2009. Modeling of Influences of Vilnius' Urban Structure Development on Fuel Consumption in Private Transport System. *International Journal of Sustainable Transportation*, 3: 39–53. <https://doi.org/10.1080/15568310701359056>
- Calle-Laguna, A. J.; Du, J.; Rakha, H. A. 2019. Computing Optimum Traffic Signal Cycle Length Considering Vehicle Delay and Fuel Consumption. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. Volume 3, 100021. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2019.100021>
- Can, A.; Aumond, P. 2018. Estimation of Road Traffic Noise Emissions: The Influence of Speed and Acceleration. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Volume 58, Pages 155–171. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.12.002>
- Chang, K.; Chon, K. 2005. A Car-Following Model Applied Reaction Times Distribution and Perceptual Threshold. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. 6: 1888–1903. <https://doi.org/10.11175/easts.6.1888>
- Ciuffo, B.; Punzo, V.; Montanino, M. 2014. Thirty Years of Gipps' Car-Following Model. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2315(1): 89–99. <https://doi.org/10.3141/2315-10>
- Dai, B.; He, Y.; Mu, F.; Xu, N.; Wu, Z. 2014. Development of a Traffic Noise Prediction Model on Inland Waterway of China Using the FHWA. *Science of the Total Environment*. 482–483:480–5. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.019>
- Derbel, O.; Péter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. 2012. Modified Intelligent Driver Model. *Transportation Engineering* 40(2): 53–60. doi: 10.3311/pp.tr.2012-2.02
- Derbel, O.; Péter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. 2013. Modified Intelligent Driver Model for Driver Safety and Traffic Stability Improvement. *IFAC Proceedings Volumes*. 46( 21): 744–749. <https://doi.org/10.3182/20130904-4-JP-2042.00132>
- Dutilleux, G.; Defrance, J.; Ecotiere, D.; Gauvreau, B.; Berengier, M.; Besnard, F.; Le Duc, E. 2010. NMPB-Routes-2008: The Revision of the French Method for Road Traffic Noise Prediction. *Acta Acustica United With Acustica* 96(3): 452–462. DOI: 10.3813/AAA.918298
- Ellebjerg, L. 2007. Noise Control through Traffic Flow Measures – Effects and Benefits. Danish Road Institute Report 151.
- Europos Komisija. *Baltoji knyga*. Briuselis, 2011-3-28 KOM (2011) 144 galutinis.

- Forssén, J.; Hoffmann, A.; Kropp, W. 2018. Auralization Model for the Perceptual Evaluation of Tyre–Road Noise. *Applied Acoustics* 132: 232–240. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.11.023>
- Garg, N.; Maji, S. 2014. A Critical Review of Principal Traffic Noise Models: Strategies and Implications. *Environmental Impact Assessment Review*. 46: 68–81. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.02.001>
- Gipps, P. G. 1981. A Behavioural Car-Following Model for Computer Simulation. *Transportation Research Part B Methodological* 15(2): 105–111. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(81\)90037-0](https://doi.org/10.1016/0191-2615(81)90037-0)
- Gomez, M. D. M.; Carvajal, G. J. C.; Rodriguez, Z. V.; Garcia, T. J. J. 2015. Assessment of the RLS 90 Calculation Method for Predicting Road Traffic Noise in Colombian Conditions. *Rev.fac.ing.univ. Antioquia* [online]. 75: 176–188. ISSN 0120-6230. <http://dx.doi.org/10.17533/udea.redin.n75a17>
- Gupta, A. K.; Redhu, P. 2013<sup>a</sup>. Analyses of Driver's Anticipation Effect in Sensing Relative Flux in a New Lattice Model for Two-Lane Traffic System. *Physica A* 392: 5622. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2013.07.040>
- Gupta, A. K.; Redhu, P. 2013<sup>b</sup>. Jamming Transition of a Two-Dimensional Traffic Dynamics with Consideration of Optimal Current Difference. *Physics Letters A* 377 (34–36): 2027–2033. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2013.06.009>
- Haider, M.; Descornet, G.; Sandberg, U.; Pratico, F. G. 2007. *Road Traffic Noise Emission: Recent Developments and Future Prospects*, International SIIV Congress, Palermo.
- Hamdar, S. H.; Qin, L.; Talebpour, A. 2016. Weather and Road Geometry Impact on Longitudinal Driving Behavior: Exploratory Analysis Using an Empirically Supported Acceleration Modeling Framework. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 67: 193–213. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.01.017>
- Hammit, B. E.; Ghasemzadeh, A.; James, R. M.; Ahmed, M. M.; Young, R. K. 2018. Evaluation of Weather-Related Freeway Car-Following Behavior Using the SHRP2 Naturalistic Driving Study Database. *Transportation Research Part F* 59: 244–259. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.08.023>
- Hansen, C. H. 2005. *Fundamentals of Acoustics*.
- Hespanhol, L.; Vallioa, C. S.; Costaa, L. M.; Saragiottoa, B. T. 2019. Understanding and Interpreting Confidence and Credible Intervals Around Effect Estimates. *Brazilian Journal of Physical Therapy*. 23(4): 290–301. <https://doi.org/10.1016/j.bjpt.2018.12.006>
- Hjelkrem, O. A.; Ryeng, E. O. 2016. Chosen Risk Level During Car-Following in Adverse Weather Conditions. *Accid. Anal. Prev.* 95: 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.07.006>
- Hong, D.; Uno, N.; Kurauchi, F. 2009. Heterogeneity in Multi-Anticipative Car-Following Behavior by Video Image Data. *International Journal of ITS Research*, Vol. 7, No.1, 39–48.

ISO 11819–1: 2002 Akustika. Kelio dangos paviršiaus poveikio eismo triukšmui matavimas. 1 dalis. Statistinis metodas (ISO 11819–1:1997)

ISO 11819–2: 2017 Akustika. Kelio dangos paviršiaus poveikio eismo triukšmui matavimas. 2 dalis. Didelio artumo metodas (ISO 11819–2:2017)

ISO 11819–3: 2017 Acoustics. Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise. Part 3: Reference tyres (ISO/TS 11819–3:2017).

ISO 9613–1. 1993. Acoustics – Attenuation of Sound during propagation outdoors – Part 1: Calculation of the absorption of Sound by the atmosphere. Šveicarija.

Yanga, D.; Zhenga, S.; Wena, C.; Jinc, P. J.; Ran, B. 2018. A Dynamic Lane-Changing Trajectory Planning Model for Automated Vehicles. *Transportation Research Part C* 95: 228–247. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.06.007>

Yang, S.; Peng, H. 2009. Development of an Errorable Car-Following Driver Model. *Vehicle System Dynamics*, Volume 48, Issue 6, pp.751–773. <https://doi.org/10.1080/00423110903128524>

Yaoa, H.; Cuia, J.; Lib, X.; Wangb, Y.; An, S. 2018. A Trajectory Smoothing Method at Signalized Intersection Based on Individualized Variable Speed Limits with Location Optimization. *Transportation Research Part D* 62: 456–473. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.03.010>

Yuana, X.; Yunb, B.; Li, C. 2015. Simulation Study on the Vehicle Mobility Model Based on the SUMO. *3rd International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation (ICMRA 2015)* 934–938. <https://doi.org/10.2991/icmra-15.2015.181>

Jablonskytė, J.; Ilgakojoytė-Bazarienė, J.; Keršys, A.; Pakalnis, A. 2011. Research of Congestions in Urban Transport Network Using Cellular Automaton Model. *Transport*. 26(2): 158–165. <https://doi.org/10.3846/16484142.2011.586107>

Jacyna, M.; Wasiak, M.; Lewczuk, K.; Karoń, G. 2017. Noise and Environmental Pollution from Transport: Decisive Problems in Developing Ecologically Efficient Transport Systems. *Journal of Vibroengineering*, 19(7): 5639–5655. <https://doi.org/10.21595/jve.2017.19371>

Jiang, C.; Cheng, R.; Ge, H. 2018. Effects of Speed Deviation and Density Difference in Traffic Lattice Hydrodynamic Model with Interruption. *Physica A* 506: 900–908. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.05.023>

Jin-Liang, C.; Zhong-Ke, Sh. 2016. Analysis of a Novel Two-Lane Lattice Model on a Gradient Road with the Consideration of Relative Current. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 33: 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2015.08.025>

Junevičius, R.; Bogdevičius, M. 2009. Mathematical Modelling of Network Traffic Flow. *Transport* 24 (4): 333–338. <https://doi.org/10.3846/1648-4142.2009.24.333-338>

Junevičius, R. 2011. *Transporto srautų modeliavimas sutelktųjų parametrų metodu gatvių tinkle: daktaro disertacija*. Vilnius: Technika. 126 p. <http://dspace1.vgtu.lt/handle/1/845>

- Kaur, R.; Sharma, S. 2017. Analysis of Driver's Characteristics on a Curved Road in a Lattice Model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.11.116>
- Kendziorra, A.; Wagner, P.; Toledo, T. 2016. A Stochastic Car Following Model. *Transportation Research Procedia*. 15: 198–207. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.06.017>
- Kesting, A.; Treiber, M.; Helbing, D. 2010. Enhanced Intelligent Driver Model to Access the Impact of Driving Strategies on Traffic Capacity. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 368. 368(1928): 4585–4605. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0084>
- Kim, J.; Mahmassani, H. S. 2011. Correlated Parameters in Driving Behavior Models: Car-following Example and Implications for Traffic Microsimulation. *Transportation Research Record*, (2249), 62–77. <https://doi.org/10.3141/2249-09>
- Klein, L.A. 2001. *Sensor Technologies and Data Requirements for ITS*. Artech House, Norwood, MA. <https://www.worldcat.org/title/sensor-technologies-and-data-requirements-for-its/oclc/46502998>
- Kliučininkas, L.; Šaliūnas, D. 2006. Noise mapping for the management of urban traffic flows. *Mechanika*. 3(59): 61–66.
- Kometani, E.; Sasaki, T. 1959. A Safety Index for Traffic with Linear Spacing. *Ops Res.*, 7: 704–720. <https://doi.org/10.1287/opre.7.6.704>
- Krajzewicz, D.; Hartinger, M.; Hertkorn, G.; Mieth, P.; Rössel, C.; Zimmer, J.; Wagner, P. 2005. Using the Road Traffic Simulation „SUMO“ for Education Purposes. *Traffic and Granular Flow*. 3: 217–222. DOI: 10.1007/3-540-28091-X\_19
- Křivánek, V.; Marková, P.; Stasyk, J.; Jedlička, J.; Špička, L.; Effenberger, K. 2017. *Dlouhodobé Hodnocení Hlučnosti Povrchů Vozovek. Certifikovaná Metodika*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 52 s. ISBN 978-80-88074-53-3. Tato metodika vznikla za finanční podpory TA ČR
- Lázaro, A. C. R.; Téllez, Q. L. A.; Jaimes, R. A. O. 2018. Parameter Identification on Helly's Car-Following Model. Proceedings of the 5th International Conference of Control, Dynamic Systems, and Robotics (CDSR'18) Niagara Falls, Canada – June 7–9, 107: 1–8. DOI: 10.11159/cdsr18.107
- Lee, S.; Wong, S. C. 2017. Group-Based Approach to Predictive Delay Model Based on Incremental Queue Accumulations for Adaptive Traffic Control Systems. *Transportation Research Part B: Methodological* 98: 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.12.008>
- Li, Y.; Sun, D. 2012. Microscopic Car-Following Model for the Traffic Flow: the State of the art. *J Control Theory Appl* 10 (2) 133–143. DOI 10.1007/s11768-012-9221-z
- Li, Q.; Qiao, F.; Yu, L. 2016. Calibration of Car-Following Models Considering the Impacts of Warning Messages from Tablet/Smartphone Application. *Journal of Transportation Technologies*. 6: 61–75. <http://dx.doi.org/10.4236/jtts.2016.62006>
- Li, Z.; Li, W.; Xu, S.; Qian, Y. 2015<sup>b</sup>. Stability Analysis of an Extended Intelligent Driver Model and its Simulations Under Open Boundary Condition. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 419: 526–536. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.10.063>

- Li, Z.; Zhang, R.; Xu, S.; Qian, Y. 2015<sup>a</sup>. Study on the Effects of Driver's Lane-Changing Aggressiveness on Traffic Stability from an Extended Two-Lane Lattice Model, *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 24 (1): 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2014.12.007>
- Liu, H.; Sun, D.; Liu, W. 2016. Lattice Hydrodynamic Model Based Traffic Control: a Transportation Cyber-Physical System Approach, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 461: 795–801. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2016.06.069>
- Mimbela, L. Y.; Klein, L. A. 2007. *A Summary of Vehicle Detection and Surveillance Technologies Used in Intelligent Transportation Systems*.
- Mukaka, M. M. 2012. Statistics Corner: A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research. *Malawi Medical Journal*. 24(3): 69–71
- Nagatani, T. 1998. Modified KdV Equation for Jamming Transition in the Continuum Models of Traffic. *Physica A* 261(3–4): 599–607. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(98\)00347-1](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(98)00347-1)
- Newell, G. F. 2002. *A Simplified Car-Following Theory: a Lower Order Model*. Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.
- Ni, D. 2016. Traffic Flow Theory Characteristics, Experimental Methods, and Numerical Techniques. *Chapter 15 – Gipps Model*. 213–222. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804134-5.00015-5>
- Okada, Y.; Tajika, T.; Sakamoto, S. 2014. Road Traffic Noise Prediction Model „ASJ RTN-Model 2013“ Proposed by the Acoustical Society of Japan – Part 2: Study on Sound Emission of Road Vehicles. *Inter-noise 2014*. 1–8 p.
- Osorio, C.; Punzo, V. 2019. Efficient Calibration of Microscopic Car-Following Models for Large-Scale Stochastic Network Simulators. *Transportation Research Part B* 119: 156–173. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.09.005>
- Ou, H.; Tang, T.; Zhang, J.; Zhou, J. 2018. A Macro Traffic Flow Model with Probability Distribution Function. *Physics Letters A* 382: 2819–2824. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2018.07.048>
- Papathanasopoulou, V.; Antoniou, C. 2015. Towards Data-Driven Car-Following Models. *Transportation Research Part C* 55: 496–509. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.02.016>
- Peng, G.; Bai, K.; Kuang, H. 2019. Feedback Control Caused by Honk Effect Incorporating the Driver's Characteristics in Lattice Hydrodynamic Model. *Physica A* 526: 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121064>
- Peng, G. H. 2013. A New Lattice Model of Two-Lane Traffic Flow with the Consideration of Optimal Current Difference. *Commun Nonlinear Sci Numer Simul* 18(3): 559–66. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2012.07.015>
- Peng, G. H.; Liu, C. Q. 2015. Tuo M.X. Influence of the Traffic Interruption Probability on Traffic Stability in Lattice Model for Two-Lane Freeway. *Physica A* 436: 952–959. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2015.05.055>

- Peng, G.; Kuang, H.; Qing, L. 2018. Feedback Control Method in Lattice Hydrodynamic Model Under Honk Environment. *Physica A* 509: 651–656. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.06.080>
- Peng, J.; Parnell, J.; Kessissoglou, N. 2019. A Six-Category Heavy Vehicle Noise Emission Model in Free-Flowing Condition. *Applied Acoustics* 143: 211–221. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.08.030>
- Podvezko, V.; Sivilevičius H. 2013. The Use of AHP and Rank Correlation Methods for Determining the Significance of the Interaction Between the Elements of a Transport System Having a Strong Influence on Traffic Safety. *Transport*. Volume 28(4): 389–403. doi:10.3846/16484142.2013.866980
- Ranjitkar, P.; Nakatsuji, T.; Kawamua, A. 2005. Car-following Models: an Experiment Based Benchmarking. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. 6: 1582–1596. <https://doi.org/10.11175/easts.6.1582>
- Rasmussen, R. O.; Bernhard, R. J.; Sandberg, U.; Mun, E. P. 2007. *The Little Book of Quieter Pavements, Federal Highway Administration*.
- Rasmussen, R. O.; Bernhard, R. J.; Sandberg, U.; Mun, E. P. 2008. *The Little Book of Quieter Pavements*. FHWA-IF-08-004. Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Rathi, A. K. 1997. *Traffic Simulation By Edward Lieberman* 18.
- Saifuzzaman, M.; Zheng, Z.; Haquea, M. M.; Washington, S. 2015. Revisiting the Task–Capability Interface Model for Incorporating Human Factors into Car-Following Models. *Transportation Research Part B* 82: 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.09.011>
- Saifuzzaman, M.; Zheng, Z. 2014. Incorporating Human-Factors in Car-Following Models: A Review of Recent Developments and Research Needs. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 48: 379–403. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.09.008>
- Sakamoto, S. 2015. Road Traffic Noise Prediction Model „ASJ RTN-Model 2013“: Report of the Research Committee on Road Traffic Noise. *Acoust. Sci. & Tech.* 36(2): 49–108. <https://doi.org/10.1250/ast.36.49>
- Sandberg, U. 2003. *The Multi-Coincidence Peak around 1000 Hz in Tyre/Road Noise Spectra. Euro-Noise, Naples*.
- Shu-Hong, Y.; Chun-Gui, L.; Xin-Lai, T.; Chuan, T. 2016. Effect of Optimal Estimation of Flux Difference Information on the Lattice Traffic Flow Model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 463: 394–399. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.07.066>
- Sipronika. 2012. *TC25 – Traffic Counter Directions for Use*.
- Sun, F.; Chow, H. F. A.; Lo, S. M.; Ge, H. 2018. A Two-Lane Lattice Hydrodynamic Model with Heterogeneous Lane Changing Rates. *Physica A* 511: 389–400. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.08.012>

- Taniguchi, Y.; Nishi, R.; Ezaki, T.; Nishinari, K. 2015. Jam-Absorption Driving With a Car-Following Model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2015.03.036>
- Tian, C.; Sun, D. H.; Zhang, M. 2011. Nonlinear Analysis of Lattice Model with Consideration of Optimal Current Difference. *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat* 16: 4524. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2011.03.012>
- Tarrero, A. I.; Martin, M. A.; Gonzalez, J.; Machimbarrena, M.; Jacobsen, F. 2008. Sound Propagation in Forests: A Comparison of Experimental Results and Values Predicted by the Nord 2000 Model. *Applied Acoustics* 69: 662–671. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2007.01.007>
- Vaitkus, A.; Andriejauskas, T.; Šernas, O.; Čygas, D.; Laurinavičius, A. 2019. Definition of Concrete and Composite Precast Concrete Pavements Texture. *Transport*, 34(3), 404–414. <https://doi.org/10.3846/transport.2019.10411>
- Van Wageningen-Kessels, F.; Van Lint, H.; Vuik, K. 2015. Genealogy of Traffic Flow Models. *EURO J Transp Logist* 4: 445–473. <https://doi.org/10.1007/s13676-014-0045-5>
- Walz, B. L.; Behrisch, M.; Junghans, M.; Gimm, K. 2017. Evaluation of Car-Following Models at Controlled Intersections. *Conference: European Simulation and Modelling Conference*. Volume: 31: 247–251.
- Wang, Y.; Cheng, R.; Ge, H. 2017. A Lattice Hydrodynamic Model Based on Delayed Feedback Control Considering the Effect of Flow Rate Difference. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 479: 478–484. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.03.027>
- Wang, J.; Rakha, H. A.; Fadhoun, K. 2017. Validation of the Rakha-Pasumarthy-Adjerid Car-Following Model for Vehicle Fuel Consumption and Emission Estimation Applications. *Transportation Research Part D* 55: 246–261. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.030>
- Wang, J.; Sun, F.; Ge, H. 2019<sup>b</sup>. An Improved Lattice Hydrodynamic Model Considering the Driver's Desire of Driving Smoothly. *Physica A* 515 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.09.155>
- Wang, Q.; Cheng, R.; Ge, H. 2019<sup>a</sup>. A New Lattice Hydrodynamic Model Accounting for the Traffic Interruption Probability on a Gradient Highway. *Physics Letters A* 383 1879–1887. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2019.03.019>
- Wang, T.; Gao, Z.; Zhang, W.; Zhang, J.; Li, S. 2014. Phase Transitions in the Two Lane Density Difference Lattice Hydrodynamic Model of Traffic Flow. *Nonlinear Dyn* 77 (6): 35–42. <https://doi.org/10.1007/s11071-014-1325-1>
- Wang, T.; Zang, R.; Xu, K.; Zhang, J. 2019<sup>c</sup>. Analysis of Predictive Effect on Lattice Hydrodynamic Traffic Flow Model. *Physica A* 526 120711. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.03.076>



- Zhang, G.; Peng, H. G. 2019. Research on the Stabilization Effect of Continuous Self-Delayed Traffic Flux in Macro Traffic Modeling. *Physica A* 526: 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.04.248>
- Zhang, G. 2018. Study on Varying Time Delay on Traffic Stability in a Novel Lattice Hydrodynamic Model. *Physica A* 505: 1103–1112. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.04.067>
- Zhao, H.; Zhang, G.; Li, W.; Gu, T.; Zhou, D. 2018. Lattice Hydrodynamic Modeling of Traffic Flow with Consideration of Historical Current Integration Effect. *Physica A* 503: 1204–1211. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.08.072>
- Zhao, J.; Ding, Z.; Hu, B.; Chen, Y.; Yang, W. 2015. Assessment and Improvement of a Highway Traffic Noise Prediction Model with  $L_{eq}(20\text{ s})$  as the Basic Vehicular Noise. *Applied Acoustics* 97: 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.03.021>
- Zheng, J.; Suzuki, K.; Fujita, M. 2013. Car-Following Behavior with Instantaneous Driver-Vehicle Reaction Delay: A Neural-Network-Based Methodology. *Transportation Research Part C* 36: 339–351. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.09.010>
- Zhu, Ch.; Zhong, Sh.; Li, G.; Ma, Sh. 2017. New Control Strategy for the Lattice Hydrodynamic Model of Traffic Flow. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 468: 445–453. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.10.080>
- Zhua, M.; Wanga, X.; Tarkoc, A.; Fanga, S. 2018. Modeling Car-Following Behavior on Urban Expressways in Shanghai: A Naturalistic Driving Study. *Transportation Research Part C* 93: 425–445. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.06.009>
- Zofka, E; Zofka, A; Mechowski, T. 2017. Pavement Noise Measurements in Poland. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 236: 012103. doi:10.1088/1757-899X/236/1/012103



---

# Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

## Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Danilevičius, A.; Bogdevičius, M.; Gusarovienė, M.; Vaičiūnas, G.; Pečeliūnas, R.; Danilevičienė, I. 2018 Determination of Optimal Traffic Light Period Using a Discrete Traffic Flow Model. *Mechanika*. Volume 24(6): 845–851. Clarivate Analytics Web of Science, IF<sub>2018</sub> = 0,500.

Danilevičius, A.; Junevičius, R. 2015. Automobilių imties generavimas bei realizavimas sekimo paskui lyderį matematiniuose modeliuose. *Mokslas – Lietuvos ateitis: Statyba, transportas, aviacinės technologijos*. Vilnius: Technika. ISSN 2029-2341. T. 7, Nr. 5, p. 564–570.

Danilevičius, A.; Bogdevičius, M. 2018. Kelių transporto srautų modelio tyrimas, taikant diskretinį transporto srautų metodą. *Mokslas – Lietuvos ateitis: Transporto inžinerija ir vadyba*. Vilnius: VGTU Press. ISSN 2029-2341. eISSN 2029-2252. Vol. 10, p. 1–5.

## Straipsniai kituose leidiniuose

Junevičius, R.; Danilevičius, A.; Ružinskas, A. 2015. Input parameters generation for the follow the leader traffic flow model. *Transport Means 2015*. Kaunas: Technologija. ISSN 1822-296X. p. 281–285.

Danilevičius, A.; Bogdevičius, M. 2017<sup>a</sup>. Investigation of traffic light switching period affect for traffic flow dynamic processes using discrete model of traffic flow. *TRANSBAL-TICA 2017*. Transportation science and technology: proceedings of the 10th international scientific conference. Vilnius: Elsevier Ltd. ISSN 1877-7058 p. 198–205.

Danilevičius, A.; Bogdevičius, M. 2017<sup>b</sup>. The investigation of traffic flow dynamics of road with traffic lights. *Vibroengineering procedia*: [29th International Conference on Vibroengineering, Vilnius, Lithuania, December 1st 2017]. Kaunas: JVE International. ISSN 2345-0533. Vol. 15., p. 141–144.

Danilevičius, A.; Bogdevičius, M. 2020. Impact of Road Traffic Accidents on the Dynamics of Traffic Flows. *Vision Zero for Sustainable Road Safety in Baltic Sea Region. VISZERO 2018*. Vilnius: ISSN 2523-3440. p. 85–92.

---

## Summary in English

### **Problem formulation**

The development of urban streets is limited by the dense layout of buildings and structures near the streets. Therefore, the traffic flow (TF) control systems play an essential role in the already existing street network. One of the most efficient control of TF is the use of traffic lights at controlled intersections.

Now deterministic traffic light cycle control methods, based on predefined vehicle density at intersection parameters, i. e. the mean values of these parameters, are applied. In fact, the TF parameters (velocity, density, flow, and acceleration) vary not only at traffic lights (intersections) but also along the entire length of the street or its section and have a stochastic nature. These TF parameters can reach values that substantially increase the noise level. Most modeling methods do not estimate these sudden changes in TF parameters. For the assessment of the living environment in the city, the most important maximum noise level values can be determined by measurement (experiment) or modeling.

Sudden changes in TF parameters cause sudden fluctuation in the noise level (NL) emitted by TF, which are particularly felt by people living, working, or simply standing near these streets. The use of noise calculation methods allows the determination of average NL values. Due to the use of these methods, it is not possible to determine the instantaneous noise level (INL).

## **Relevance of the thesis**

One of the main strategic documents of transport policy at the level of the European Union (EU) „2011 y. Transport Policy White Book“ raises an important environmental issue. The document states that the transport sector has become cleaner, but it continues to grow, so cities suffer from traffic congestion, poor air and noise (Baltojiknyga, 2011).

Development and improvement of new traffic flow research methods are important for predicting the characteristics of TF change under different traffic conditions. Assessing the existing TF (flow, density) and environmental conditions (permissible speed, street permeability, road surface condition, meteorological conditions, road obstacles), rational TF control can be determined by modeling to achieve maximum street permeability.

Current methodologies let obtain average NL values. However, they do not provide the necessary information about the causes of NL changes as TF dynamic processes change. It is important to determine the range within which NL change and how quickly these changes occur in order to determine the effects of noise on people close to the streets. Therefore, the aim is to develop a methodology that would allow modeling the NL at any point in time, at any node in the modeled street. It could be used to make proposals for TF control to reduce noise level in the city.

## **The object of the thesis**

The object of the thesis is the interaction between road traffic flows in the streets, the surrounding environment and the instantaneous noise level emitted by vehicles.

## **The aim of the thesis**

To modify the discrete traffic flow research method, which enables evaluating their dynamic processes influencing the instantaneous noise level emitted on city streets.

## **The tasks of the thesis**

For an implementation of the aim of the thesis, the following tasks were set:

1. To analyze the scientific works, methods and tools of the study of dynamic processes of traffic flows and vehicle noise allowing their capabilities to be assessed.
2. To perform experimental research on traffic flows dynamic processes, which enables to modify the discrete traffic flow research method.
3. To assess the influence of traffic light switching period and traffic accident elimination duration on traffic flow dynamic processes upon applying the modified discrete traffic flow research method.
4. To carry out experimental research on the noise level of traffic flow, assessing the condition of the road surface, velocity and category of vehicles and to develop a methodology for the study of the noise level of traffic flow.
5. To determine the instantaneous noise level of traffic flow by applying the developed traffic flow noise research methodology to the modified discrete traffic flow research method.

## The research methodology

In this thesis, the modified discrete traffic flow research method and the developed instantaneous noise level research methodology are applied. Here the mathematical modeling and results processing software: *Visual Studio – Fortran, Matlab, Brüel&Kjær - Measurement Partner Suite, Microsoft Office* were used. TC25 TS counter classifier was used for experimental research of traffic flows. The noise analyzer *Brüel&Kjær 2250* was used for the examination of the acoustic contamination of traffic flows. The measurement system *CPX* from the Brno Transport Research Center (Czech Republic), based on the proximity method for noise measurement, was used to measure the noise caused by the tyre-road interaction.

## Scientific novelty of the thesis

In course of preparation of the thesis, the following results innovative for Transport Engineering science were obtained:

1. The parameters of the discrete traffic flow research method, which were obtained from experimental studies and enabled to obtain more accurate modeling results when the traffic flow starts to move, were improved.
2. A methodology for determining the instantaneous noise level emitted by traffic flow upon applying the results of experimental research and the modified discrete traffic flow research method has been developed.
3. Upon applying the modified discrete traffic flow research method and the experimental data on the noise level, it is possible to determine the instantaneous noise level in each node of the modeled street with the possibility to determine the revised average noise level.

## Practical value of the research findings

Using modified discrete traffic flow research method the obtained results of the traffic flow dynamic process modeling can be used to determine the traffic light switching time by estimating the traffic flow changes and reducing the traffic flow noise level. The effect of a short-term street obstacle on traffic flow parameters can be determined as well. Also, the modified discrete traffic flow research method with the instantaneous noise level research methodology can be applied in the control of urban traffic.

## Defended statements

1. Upon applying the modified discrete traffic flow research method, the dynamics of traffic flow are more accurately assessed when vehicle traffic is interrupted at a controlled intersection. Experimental research of traffic flow assessed the delay of vehicles moving in the resulting queue of vehicles.
2. The modified discrete traffic flow research method enables analyzing the rapidly changing dynamic processes of traffic flows in the street network as a continuous dynamic system with changing system parameters and determining the instantaneous noise level at each street node.

3. Upon applying the improved discrete traffic flow research method, it is possible to determine the influence of possible traffic accidents other short-term obstacles on the traffic flow dynamics and the changes of the traffic intensity in different street nodes. In addition, it is also possible to predict how long it will take to return to steady vehicle traffic on the section of street in question after the elimination of the consequences of a minor traffic accident.
4. Upon applying the modified discrete traffic flow research method and the data on the experimental noise level measurements, it is possible to determine the instantaneous noise level at each node of the traffic flow model and to determine the revised average noise level values that allow identifying efficient noise reduction measures in traffic control – use of the traffic lights.

### **Approval of the research findings**

7 scientific papers were published on the topic of the thesis: one – in a scientific journal, included in the *Clarivate Analytics Web of Science* database (Danilevičius *et al.* 2018); two – in a peer-reviewed scientific journal (Danilevičius, Junevičius 2015; Danilevičius, Bogdevičius 2018), four – in peer-reviewed international conference materials (Junevičius *et al.* 2015; Danilevičius, Bogdevičius 2017<sup>a</sup>; Danilevičius, Bogdevičius 2017<sup>b</sup>; Danilevičius, Bogdevičius 2020).

The results of the research conducted in this thesis were presented at five conferences in Lithuania:

- International conference „*Transport Means 2015*“ 2015, Kaunas;
- International conference „*Transbaltica 2017*“ 2017, Vilnius.
- International conference „*Vibroengineering*“ 2017, Vilnius;
- Conference of Young Scientists „*Science – the Future of Lithuania: Transport Engineering and Management*“ 2018, Vilnius;
- International Conference „*Vision Zero for Sustainable Road Safety in Baltic Sea Region*“ 2018, Vilnius.

### **The structure of the thesis**

The thesis consists of the introduction, four chapters and general conclusions. In addition, one annex is enclosed.

The volume of the thesis is 143 pages, excluding the annexes, 65 numbered formulas, 64 figures and 8 tables are used in the text. 108 literature sources were used when preparing a dissertation.

### **Acknowledgements**

I would like to thank my thesis supervisor Prof. Habil. Dr. Marijonas Bogdevičius for his patience, valuable scientific consultations and advice. I am very grateful to Prof. Habil. Dr. Henrikas Sivilevičius for valuable advice. I would like to express my gratitude to my internship supervisor Vitezslav Krivanek and all the staff members from the Transport Research Center for warm welcome, assistance and technical support they provided during my internship. I am grateful to all employees of Department of Mobile Machinery and



Railway Transport for support and valuable advice. I want to sincerely thank my family for their support, understanding and patience.

## 1. Analysis of research methods for traffic flow and its noise level

The discrete traffic flow research method (DTFRM) developed by scientists (Junevičius, Bogdevičius (2009), Bogdevičius, Junevičius (2014)) uses a system of equations that takes into account two parameters: density and velocity of TF. These parameters are calculated at each street node and take into account the density and velocity data from the previous and the next particular street node (Fig. S.1.1). Upon applying this method, the modeled street is divided into elements of a certain length marked in Figure S.1.1. as symbol  $L$ . The length of these elements is selected depending on the desired modeling accuracy. The shorter  $L$  elements, the more accurate results are obtained. Nodes  $i$  connect adjacent street elements. The coordinate of the nodes is described by adding or subtracting the  $n$ -th node.

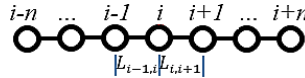


Fig. S.1.1. Schematic representation of traffic flow values at each node on street

The equations (S.1.1, S.1.2) are provided for each street node  $i$ . The equation (S.1.1) describes the change in TF velocity, and the equation (S.1.2) describes the change in density at each street node  $i$ :

$$\dot{v}_i = \sum_{j=1}^{N_{in}} p_{in,i,j}(t) r_{v_i,in,i,j} \Phi_{v_i,in,i,j} \left( k_j(t - \tau_{i,j}), v_j(t - \tau_{i,j}), k_i(t), v_i(t) \right) v_i(t) - \sum_{j=1}^{N_{out}} p_{out,i,j}(t) r_{v_i,out,i,j} \Phi_{v_i,out,i,j} \left( k_i(t), v_i(t), k_j(t), v_j(t) \right) v_i(t); \quad (S.1.1)$$

$$\dot{k}_i = \sum_{j=1}^{N_{in}} p_{in,i,j}(t) r_{k_i,in,i,j} \Phi_{k_i,in,i,j} \left( k_j(t - \tau_{i,j}), v_j(t - \tau_{i,j}), k_i(t), v_i(t) \right) k_i(t) - \sum_{j=1}^{N_{out}} p_{out,i,j}(t) r_{k_i,out,i,j} \Phi_{k_i,out,i,j} \left( k_i(t), v_i(t), k_j(t), v_j(t) \right) k_i(t), \quad (S.1.2)$$

here  $k_i(t)$  – the density at  $i$ -th street node;  $v_i(t)$  – the velocity at the  $i$ -th street node;  $p_{in,i,j}$ ,  $p_{out,i,j}$  – the probabilities of splitting or merging the TF at a given street node  $i$ ,  $j$ ;  $r_{k_i,in,i,j}$ ,  $r_{k_i,out,i,j}$ ,  $r_{v_i,in,i,j}$ ,  $r_{v_i,out,i,j}$  – DTFRM coefficients;  $\Phi_{k_i,in,i,j} \left( k_j(t - \tau_{i,j}), v_j(t - \tau_{i,j}), k_i(t), v_i(t) \right)$ ;  $\Phi_{k_i,out,i,j} \left( k_i(t), v_i(t), k_j(t), v_j(t) \right)$ ;  $\Phi_{v_i,in,i,j} \left( k_j(t - \tau_{i,j}), v_j(t - \tau_{i,j}), k_i(t), v_i(t) \right)$ ;  $\Phi_{v_i,out,i,j} \left( k_i(t), v_i(t), k_j(t), v_j(t) \right)$  – nonlinear functions of the discrete traffic flow model;  $N_{in}$ ,  $N_{out}$  – the number of lanes entering and leaving the  $i$ -th street node.

DTFRM While describing the changes of the density and velocity of the modeled street node upon applying DTFRM, the constant coefficients  $r_{k_i, in, i, j}$ ,  $r_{k_i, out, i, j}$ ,  $r_{v_i, in, i, j}$ ,  $r_{v_i, out, i, j}$  in the equations are considered as constant method parameters.

Bazaras *et al.* (2008) distinguished three types of vehicle emitted noise: vehicle system noise, rolling noise and driver-induced noise. In a vehicle, noise comes from the engine, gearbox, exhaust systems, chassis and wheels. Rolling noise is caused by the interaction between the tyre and the road. The influence of driver on the noise level (NL) is assessed by using an audible signal, sudden acceleration, or delay-move.



The NL emitted by moving vehicles is mostly affected by tyre-road interaction (Rasmussen *et al.* 2008). Tyre-road interaction noises appear due to vibration, aerodynamic noise and amplification (Haider *et al.* 2007).

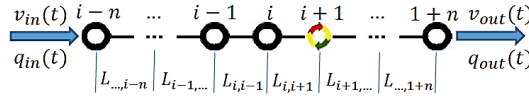
As the velocity and concentration of vehicle increase, the NL intensity increases as well. Depending on the road surface under the moving vehicle, different noise intensities are heard at the same vehicle velocity. The NL emitted by the engine depends on its power and the gear engaged, which determines the engine revolutions. Higher noise levels are heard at higher engine revolutions. Typically, the distribution of vehicles on the street is uneven. When vehicles are spaced at different distances from each other, the NL fluctuates and is particularly noticeable. NL fluctuations are also strongly influenced by vehicle acceleration and deceleration. The approaching vehicle emits a more intense NL than the receding, so the direction of vehicle movement is also an important factor in predicting the NL.

Individual vehicle parts as noise sources become more or less noisy at different vehicle velocities. Rasmussen *et al.* (2008) found that at low velocity (for passenger cars up to 15–40 km/h, for heavier vehicles up to 55–80 km/h), vehicle engine noise is higher than tyre-road interaction noise. As the velocity of the vehicle increases, the NL of the tyre-road interaction becomes more important for the overall NL. When the vehicle is traveling at a velocity higher over 80 km/h, the overall NL is increased by the aerodynamic NL.

Widely used methods for vehicle noise research allow determining only the average vehicle noise in a selected time interval. The hourly average noise level is usually determined.

## 2. Modified discrete traffic flow research method and developed instantaneous noise level research methodology

In course of examining the TF dynamic processes, a schematic model of the investigated street was created according to the principal scheme for constructing a TF model provided in Fig. S.2.1. In the model, the street under research is divided into street elements of the selected lengths  $L_{i, i+1}$ . The connection places of these street elements are named as street nodes  $i$ . Nodes are numbered and marked with a symbol  according to the principal scheme. Nodes are numbered and marked with a symbol according to the principal scheme. If there are traffic light controlled intersections on the modeled street, then the street node corresponding to the location where the intersection is controlled is marked with the symbol .



**Fig. S.2.1.** Scheme for the traffic flow model: street node  $i$ , which connects the street elements  $L_{i,i+1}$  and  $L_{i,i-1}$ ;  $\bullet$  – street node without traffic light;  $\circ$  – street node with traffic light

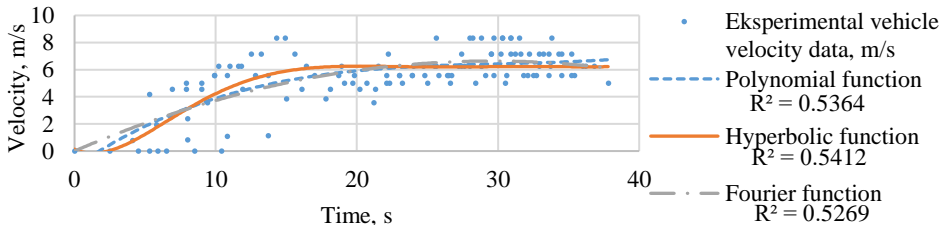
The following assumptions were accepted in the research on TF dynamic processes:

1. A section of a straight and one-way street with a single traffic lane is analyzed.
2. At the beginning of the street section, the average velocity and the traffic intensity of the TF are known and at the end of the street section, the density of vehicles is known.
3. In TF research, the traffic light signals of all controlled single-level intersections switch at the same time points, i. e. the „green wave“ is not considered.
4. The „overloaded“ TF is being investigated, i. e. morning or afternoon TF; entrances and exits to side streets are not taken into account.
5. The traffic flow is considered as homogeneous, i. e. all vehicles are passenger cars.

While analyzing TF dynamic processes, it is necessary to know the variation of TF variables at the marginal nodes of the street section (boundary conditions), i. e. how the TF parameters, such as density, velocity or flow intensity, change at the entrance and exit street nodes (Fig. S.2.1). The TF parameters  $v_{in_0}$ ,  $q_{in_0}$  can also be random variables that can vary according to a certain regularity to be determined by TF analysis.

Constant coefficients  $r_{k_i,in,i,j}$  and  $r_{k_i,out,i,j}$  in the equations (S.1.1, S.1.2) were used in the DTFRM to describe the change in density and velocity in the modeled street node, which were accepted as constant method parameters. However, in the research of TF using DTFRM, it was observed that when the TF stops in front of the traffic light and when traffic light switches to green, the vehicle acceleration values are obtained too high.

Therefore, experimental research on TF velocity variation was performed before the traffic light controlled intersection to determine which TF parameter variation function (Figure S.2.2) would be rational to use. By plotting the most appropriate regression curves (polynomial, hyperbolic tangent, Fourier) through the experimental data points, it was found that the largest value of the coefficient  $R^2 = 0,541$  of determination is the function of the hyperbolic tangent.



**Fig. S.2.2** Comparison of traffic flow velocity variation functions based on experimental vehicle velocity data, when traffic light switches to green

Therefore, the experimental researches of TF revealed that the most rational functions of the change of these parameters are the following (S.2.1 and S.2.1):

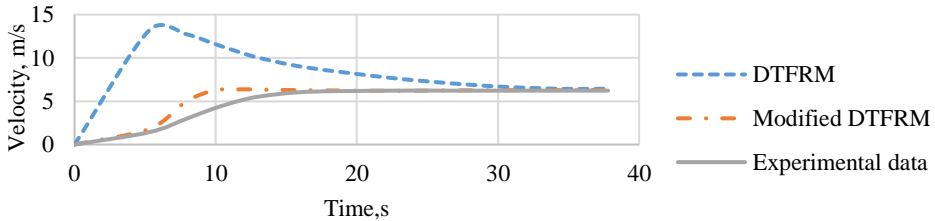
$$r_{k_i,in,i,j} = \tanh \left( c_{k_{in}} \left( \frac{k_i(t)}{k_{i,max}} \right)^2 \right); \quad (S.2.1)$$

$$r_{k_i,out,i,j} = \tanh \left( c_{k_{out}} \left( \frac{k_i(t)}{k_{i,max}} \right)^2 \right), \quad (S.2.2)$$

here  $c_{k_{in}}$ ,  $c_{k_{out}}$  – coefficients,  $c_{k_{in}} = 0.15$ ;  $c_{k_{out}} = 0.15$ ;  $\tanh$  – hyperbolic tangent;  $k_{i,max}$  – maximum possible density, veh./m;  $k_i(t)$  – density in time  $t$ , veh./m.

Since the movement of TF depends on the current density and the maximum possible density  $k_i(t)$  on the street  $k_{i,max}$ , the changes of  $r_{k_i,in,i,j}$  and  $r_{k_i,out,i,j}$  depend on the existing conditions on the street. Upon improvement of DTFRM by varying the coefficients  $r_{k_i,in,i,j}$  and  $r_{k_i,out,i,j}$  the velocity variation curves of the TF at the traffic light, when traffic light switches to green, were obtained. Before the improvement, a clear discrepancy between the experimental results could be seen (Fig. S.2.3). When traffic light switches to green, for the first 20 s, the difference between these curves is 263.4%. After 20 s to 40 s the difference decreases to 8.62%.

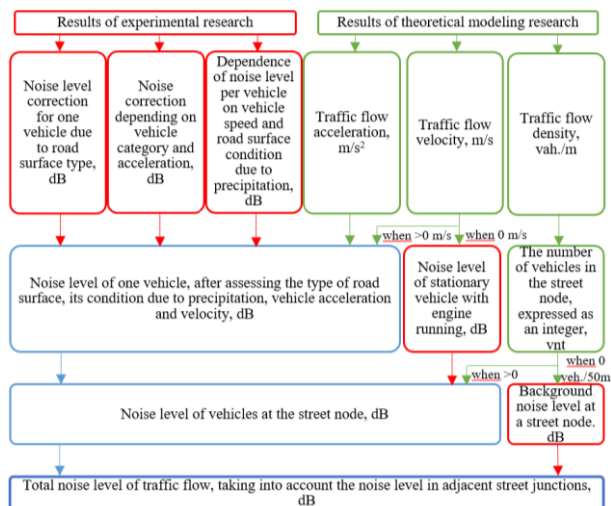
And the results of the change in TF velocity with motion obtained during simulation using the improved DTFRM are much more accurate. When traffic light switches to green, for the first 20 s, the difference between these curves is 31.4%. After 20 s to 40 s, the difference decreases to 0.706%. This difference may vary depending on the current density on the modeled street. While comparing between DTFRM and modified DTFRM, the results were closer to experimental TF velocity change by 231% within the first 20 s, after the traffic light switches to green. After 20 s to 40 s, the difference decreases to 7.91%. In addition, the TF transition process was halved to a steady velocity.



**Fig. S.2.3.** Comparison of experimental and theoretical results of traffic flow changes, when traffic light switches to green

When determining the instantaneous noise level (INL) emitted by the TF at any time, it is necessary to know the values of the parameters influencing it that vary over time. To calculate the instantaneous noise emitted by the vehicles, we have developed a methodology (INLRM) that allows estimating the velocity, acceleration and density at the relevant

street nodes. The sequence of the instantaneous NL calculation propagated by the TF is shown in Fig. S.2.4.



**Fig. S.2.4.** A sequence of methodology for calculation of instantaneous noise level emitted by traffic flow

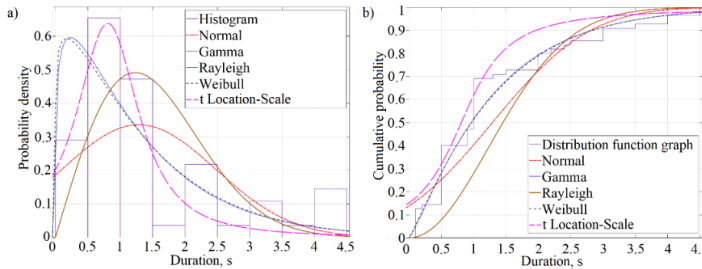
These parameters are obtained from the performed theoretical modeling upon applying the modified DTFRM. The type of road surface, the category of vehicle and the condition of the road surface due to precipitation with correction coefficients are obtained from experimental measurements.

INLRM consists of two groups of data used: the results of theoretical research and the results of experimental research. Using the modified DTFRM, the results of theoretical research of TF dynamics processes are obtained. INLRM requires TF velocity, acceleration and density data to determine how the noise level varies with changes of these dynamic TF parameters. The results of experimental research are designed to link the parameters of TF dynamic processes with NL emitted by vehicles. From the experimental researches INLRM, the following results are required: values of NL emitted during road-tire interaction at different road surfaces; dependence of NL change on vehicle acceleration and vehicle category; the dependence of the emissions of individual vehicle categories on their velocity of movement and the condition of the road surface due to precipitation (dry asphalt, wet asphalt, snow-covered). The instantaneous noise level (INL) is calculated at each street node where the speed, acceleration and density of the TF are known.

### 3. Experimental research on traffic flow dynamic processes and its noise

Experimental studies of TF were performed to determine the dynamic process parameters of TF as it moved to the intersection, when traffic light switches to green. These studies were necessary in order to modify the DTFRM coefficients and obtain more accurate TF motion results.

Experimental studies were performed at Ozo str. in Vilnius, using a video camera. At the time of TF registration, there was good visibility, no precipitation, time of day. While analyzing the video, the vehicle speeds for acceleration and the delay time for moving, when traffic light switches to green, were determined.

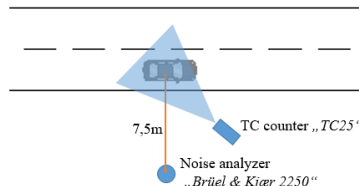


**Fig. S.3.1.** Vehicle movement delay time: a) distribution histogram with the distribution curves; b) graph of the cumulative distribution function with distribution curves

On the base of the results, it can be stated that the reaction time of drivers was from 0 to 4.5 s, but the most common was between 0.5 and 1.5 s (Fig. S.3.1 a.). The graph of the distribution function with the distribution curves (Fig. S.3.1 b.) shows the probability of the vehicle motion delay. In addition, a better match between the function graph and the distribution curve indicates which distribution curve is the most suitable for estimating the vehicle delay when modeling TF. According to the obtained results, the Weibull distribution curve with an error 5.51% is the most suitable for estimating the vehicle delay when modeling TF.

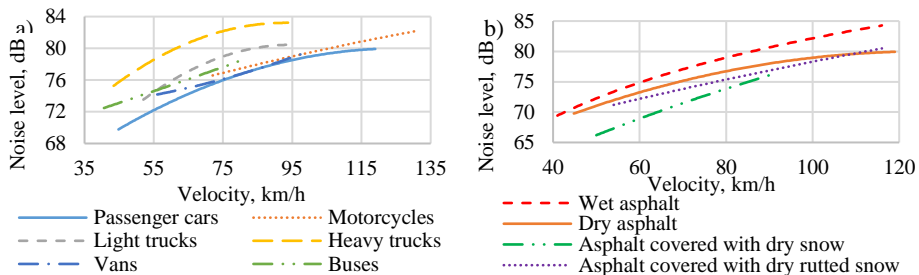
In order to determine the effect of changed ambient weather conditions on the velocity of vehicle, experimental research was performed during the winter, before the onset of snow and during intense snowfall. The research was carried out in Kairėnų st., Vilnius. The average velocity of the vehicles was recorded on a TC25 TF counter classifier. It was found that the average velocity of the vehicles decreased by about 10% due to the deterioration of visibility and the change of the condition of the road surface due to snow.

Experimental studies of the dependence of the NL emitted by the vehicles on its velocity and the condition of the road surface were performed according to the instructions specified in the ISO 11819–1 (2002) standard for the statistical method of measuring the noise emitted by a road vehicle Statistical Pass-By (SPB). The devices used for these researches were the noise analyzer *Brüel & Kjær 2250* and the TF counter classifier *TC25* TF (Fig. S.3.2). The research was carried out in Kairėnų st., Vilnius. The study site had undamaged asphalt concrete with up to 11 mm of crushed stone (AC 11).



**Fig. S.3.2.** Location of devices for noise level measurements by SPB method near the street

Upon applying the SPB method, it was found that at velocity of 70 km/h, passenger car noise level was 75 dB (Fig. 3.3 a.), other vehicles were on average noisier: motorcycles – by 1.2 dB (1.5%), vans – 2.7 dB (3.6%), buses – 1.9 dB (2.5%), light trucks – 3.1 dB (4.1%), heavy trucks – 6.7 dB (8.9%). These experimental data show that the composition of the traffic has a significant effect on the overall noise level on a city street.



**Fig. S.3.3.** Generalized noise level dependence on: a) velocity for different vehicle categories, when driving on dry asphalt; b) passenger car velocity in a different state of asphalt pavement

Experimental researches, in addition to dry asphalt pavement, were performed in the presence of: wet, covered with dry snow and covered with dry rutted snow road surface (Fig. S.3.3 b.).

The NL of the car measured on the dry asphalt surface at 70 km/h measured by the statistical method SPB, was 75 dB, while driving on the same but wet pavement, the NL increased by 2.2 dB (2.9%). While driving on compressed dry snow paved asphalt, NL decreased by 3.4 dB (4.8%) and NL decreased by 1.0 dB (1.3%) while driving on dry rutted snow.

The measurement system *CPX* from the Brno Transport Research Centre (Czech Republic), based on the proximity noise measurement method, was used to measure the noise caused by the tyre-road interaction. Measurements were performed according to ISO 11819-2 (2017) at a velocity of 50 km/h on dry pavements.

The average NL values determined by the tyre-road contact noise *CPX* method are presented in Table S.3.1.

**Table S.3.1.** *CPX* average noise values between the dry road surface and tyre interaction at the velocity of 50 km/h

Marking of asphalt or concrete	Noise level (CPX), dB	Noise level correction factor, dB
FrostGrip 11	92.4	+1.9
SMA 11	91.6	+1.1
PA 8	91.0	+0.5
AC 11	90.5	0
CBK 11	89.7	-0.8
BBTM 8	88.5	-2.0

According to the developed INLRM, it is necessary to estimate the road surface of the modeled street by adding or subtracting the coefficients provided in Table S.3.1 respectively from the value of the NL emitted by the individual vehicle obtained by the SPB method.

#### 4. Analysis of the influence of theoretical modeling results on traffic flow parameters and the instantaneous noise level

According to the principal scheme presented in the second chapter to create the TF model (Fig. S.2.1.), a one-way street section calculation scheme was created (Fig. S.4.1.).

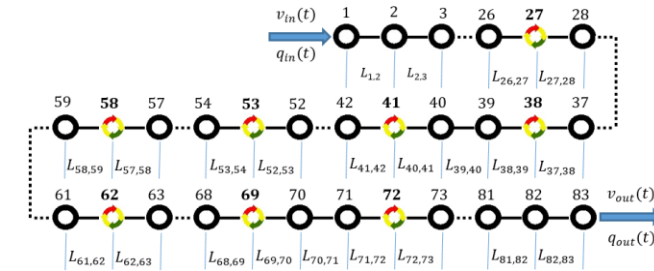


Fig. S.4.1. One-way street section calculation scheme:

○ – street node without traffic light; ● – street node with traffic light

For this purpose, the entire modeled street was divided into 50 m street elements of equal length and the controlled intersections were marked in the model. The street was modeled for one-way traffic towards the city centre. In the calculated scheme, street nodes with traffic light controlled intersections (indicated by the symbol ●) and street nodes without traffic lights (indicated by the symbol ○) are marked.

In order to determine the rational traffic light signal switching period, TF dynamic process modeling was performed for 11 different periods. The simulation results are shown in Fig. S.4.3.

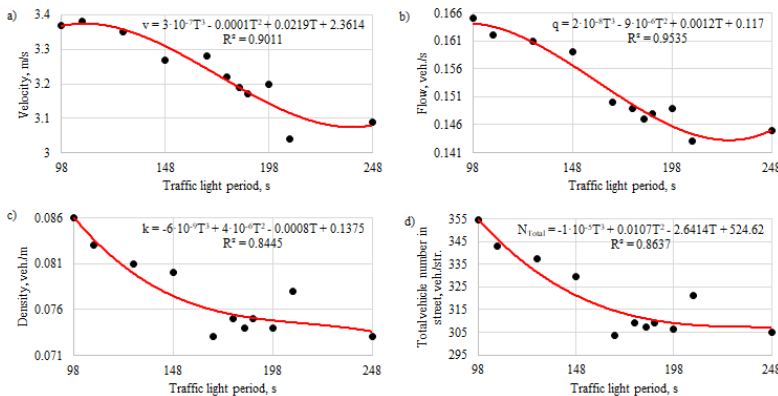


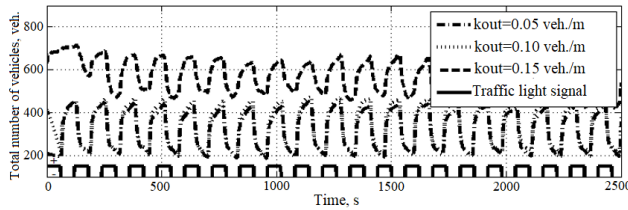
Fig. S.4.2. Dependence of traffic flow parameters on the traffic light switching period:

a) velocity; b) flow; c) density; d) total number of vehicles on the street



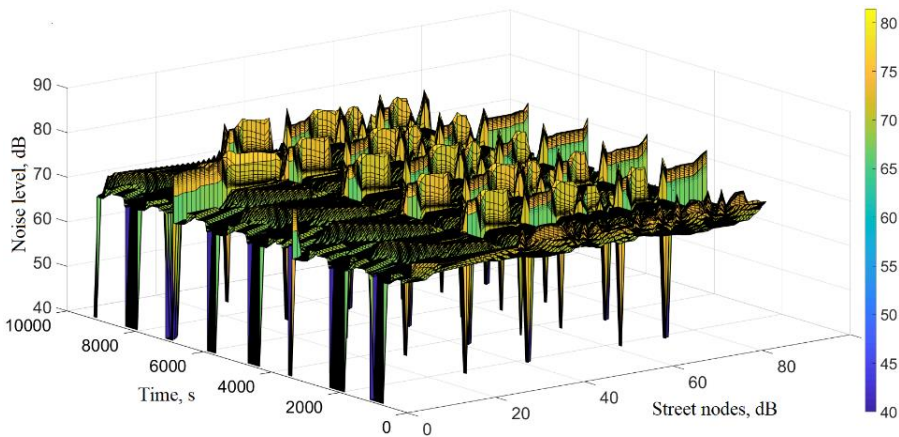
Based on the obtained results, the average values of TF velocity, flow, density and total number of vehicles on the street of the whole street section were obtained by modeling at different traffic light connection periods.

In order to determine how the dynamic processes of TF change in the modeled street, depending on the conditions at the end of the street and the period of traffic light signals at controlled intersections, modeling was performed with different density values  $k_{out} = (0.05; 0.1; 0.15)$  veh./m at the last node of the modeled street. The figure (Fig. S.4.3.) shows the total change of the number of vehicles in the whole modeled street, when the traffic light switching period is  $T = 128$  s, and the density  $k_{out} = (0.05; 0.1; 0.15)$  veh./m in the last node of the modeled street.



**Fig. S.4.3.** Comparison of the variation in the total number of vehicles on the street, when the traffic density  $k_{out} = (0.05; 0.1; 0.15)$  veh./m at the last node of the modeled street, and the traffic light switching period  $T = 128$  s

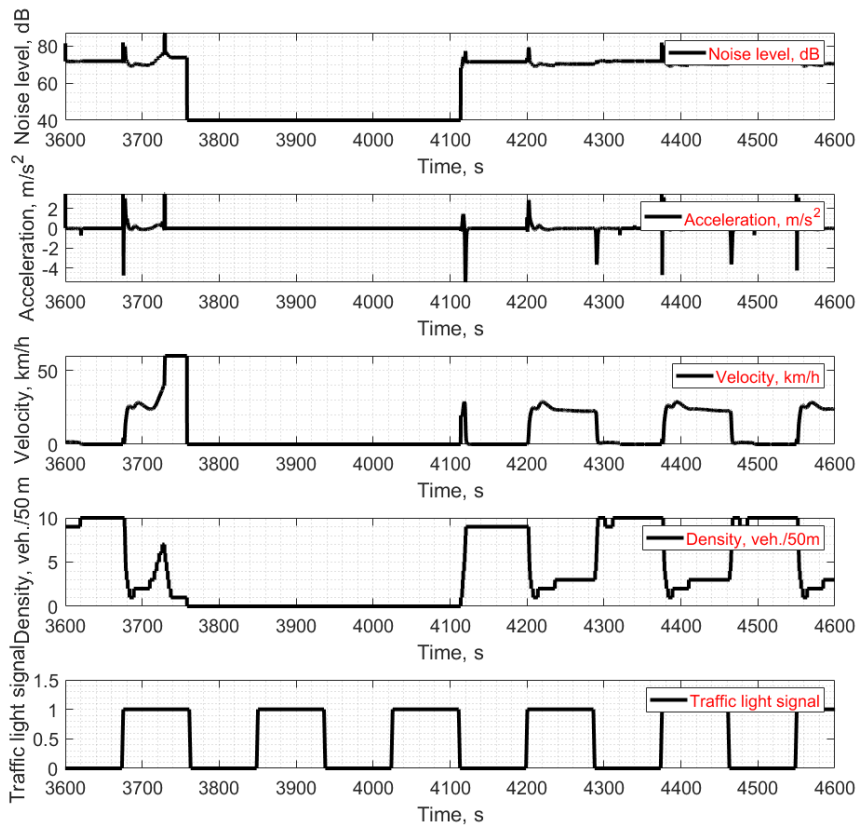
Using the results of the TF dynamic processes obtained by the modified DTFRM in the developed INLRM, we obtain the results of the instantaneous noise level (INL) of the modeled street (Fig. S.4.4). Across the street, INL varies from the background noise level typical for the modeled street (40 dB) to 81.4 dB. To obtain the results the condition was introduced that the TF consists of a homogeneous TF, that is, only the regression equation of dry asphalt pavement (ACO 11) of passenger cars is used.



**Fig. S.4.4.** Variation of traffic flow emitted instantaneous noise level in time, for all of the nodes in the street

To investigate the impact of unexpected obstacles on the road to TF dynamic processes and INL, changes in TF dynamic processes during and after an accident were investigated. It was found that as the duration of the elimination of the consequences of traffic accidents increases, the duration of TF recovery to the initial steady state, which was before the traffic accident, increases according to the exponential dependence. As the duration of the elimination of the consequences of traffic accidents increases, the total number of vehicles on the street increases according to the linear dependence.

Using the results of the TF dynamic processes obtained by the modified DTFRM and applying them to the INLRM, the influence of the traffic accident on the noise level was determined (Fig. S.4.5). Across the street, the INL varies from background noise level typical for the modeled street (40 dB) to 87.2 dB.



**Fig. S.4.5.** Time dependence of instantaneous noise level and traffic flow parameters: a) noise level; b) acceleration; c) velocity; d) number of vehicles; e) traffic signal, during a traffic accident, at 71st street node

The highest noise level values were found at node 71. This simulated street node is before a one-degree traffic light-controlled intersection. Here the maximum INL is

87.2 dB, when the acceleration of TF movement ( $3.5 \text{ m/s}^2$ ), which increased after emptying the street and the traffic density ( $0.12 \text{ veh./m}$ ) and the velocity of TF is  $16.6 \text{ m/s}$ .

The resulting variable instantaneous noise level data enables to obtain more accurate hourly or daily noise level values, which would also allow creating more accurate noise level maps.

## General conclusions

1. After the experimental research of traffic flow dynamic processes, the traffic flow velocity variation, when traffic light switches to green was determined, and this enabled modifying the traffic flow discrete research method. The modified traffic flow research method is presented, with adjusted variable coefficients, which enabled obtaining more than tripled accurate parameters of traffic flow movement. Accelerations of traffic flow were adjusted for the moment of start of movement of the traffic flow when traffic light switches to green.
2. After applying the modified discrete traffic flow research method, it was found that the average values of traffic flow parameters (velocity, density, flow) decrease with increasing the period duration from 108 to 248 of traffic light switching. A rational traffic light switching period of 108 s was found in case of intensive traffic flow when the initial density of vehicles is  $0.1 \text{ veh./m}$ .
3. Upon applying the modified discrete traffic flow research method, it was found that there is a close to linear relationship between the duration of traffic accident elimination and the increasing number of vehicles on the street and a nonlinear (exponential) relationship between the duration of traffic accident elimination and traffic flow recovery to initial steady state.
4. After performed experimental researches of traffic noise level, which was estimated the condition of the road surface, the velocity and category of the vehicles, instantaneous noise level research methodology has been developed, allowing the estimation of the instantaneous noise level at any node.
5. Using the modified discrete traffic flow research method and the developed instantaneous noise level research methodology, the instantaneous traffic noise level near intersections was determined; it varies to 81.4 dB when there is no traffic accident on the modeled street, and to 87.2 dB in presence of a traffic accident, when the density of vehicles is  $0.12 \text{ veh./m}$  and the traffic flow velocity is  $16.6 \text{ m/s}$ .



---

## Priedai<sup>3</sup>

**A priedas.** Transporto priemonių judėjimas užsidegus žaliajam šviesoforo signalui

**B priedas.** Autoriaus sąžiningumo deklaracija

**C priedas.** Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą daktaro disertacijoje

**D priedas.** Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

---

<sup>3</sup> Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Algimantas DANILEVIČIUS

DISKRETINIS KELIŲ TRANSPORTO  
PRIEMONIŲ SRAUTO TYRIMO METODAS  
MOMENTINIAM TRIUKŠMO LYGIUI  
GATVĖSE NUSTATYTI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,  
transporto inžinerija (T 003)

DISCRETE ROAD TRAFFIC FLOW  
RESEARCH METHOD TO DETERMINE  
THE INSTANTANEOUS NOISE LEVEL  
ON STREETS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,  
Transport Engineering (T 003)

2020 05 22. 12,0 sp. I. Tiražas 20 egz.  
Vilniaus Gedimino technikos universiteto  
leidykla „Technika“,  
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,  
<http://leidykla.vgtu.lt>  
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“  
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius